



TUGAS AKHIR – TM 090340

**DESAIN CONTROLLER MOTOR BLDC UNTUK
MENINGKATKAN PERFORMA (DAYA OUTPUT)
SEPEDA MOTOR LISTRIK**

**Nanang Masudi
2111 030 069**

**Dosen Pembimbing 1
Liza rusdiyana ST, MT
NIP. 19601025 198701 1 001**

**Dosen Pembimbing 2;
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing, Ph.D
NIP. 19751120 200212 1 002**

**PROGRAM STUDI D3 TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**



Final Project – TM 090340

**DESIGN OF BLDC MOTOR CONTROLLER FOR
INCREASING THE OUTPUT PERFORMANCE
(OUTPUT POWER) FROM ELECTRIC BIKE**

**Nanang Masudi
2111 030 069**

**Advisor Lecturer1
Liza rusdiyana ST, MT
NIP. 19601025 198701 1 001**

**Advisor Lecturer2;
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing, Ph.D
NIP. 19751120 200212 1 002**

**STUDY PROGRAM DIPLOMA III
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh November Institute of Technology
Surabaya 2014**

LEMBAR PENGESAHAN

“DESAIN CONTROLLER MOTOR BLDC UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA (DAYA OUTPUT) SEPEDA MOTOR LISTRIK”

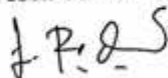
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya
Pada
Bidang Studi Manufaktur
Program Studi Diploma III Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :


NANANG MASUDI
NRP. 2111 030 069

Mengetahui dan Menyetujui
Dosen Pembimbing 1



Liza Rusdiyana ST, MT
NIP. 19601025 198701 1 001

Dosen Pembimbing 2



Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing. Ph.D
NIP. 19751120 200212 1 002

SURABAYA, JULI 2014

DESAIN CONTROLLER MOTOR BLDC UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA OUTPUT (DAYA) PADA SEPEDA MOTOR LISTRIK

Nama Mahasiswa : Nanang Masudi
NRP : 2111 030 069
Program study : D-3 Teknik Mesin FTI -ITS
Dosen Pembimbing : 1. Liza Rusdiyana ST, MT
: 2. Dr.Hendro Nurhadi,
Diplm.Ing., PhD.

Abstrak

Motor brushless dc atau biasa di sebut dengan BLDC motor merupakan salah satu jenis motor yang sering digunakan dalam dunia industri, baik itu dibidang atmosphere, konsumen, otomasi medis, industri dan peralatan instrumentasi, serta dibidang otomotif. Motor Jenis Ini Berbeda Dengan Motor DC Biasa, Karena Motor Ini Memiliki Tiga Fasa Sehingga Memerlukan System Otomasi Guna Arus Listrik Dan Voltage Terdistribusi Dengan Sempurna Pada Masing-Masing Fasa. Pada Laporan Akhir Ini Akan Dibahas Tentang Metode Six-Step Switch Mode Dengan Menggunakan Software Matlab Simulink r2009a

Hasil yang diperoleh yaitu data berupa grafik diantaranya adalah *phase current_abc*, *EMF waveform*, *electrical torque*, dan *rotor speed*. Berdasarkan simulasi virtual ysng telah dilakukan didalam penelitian dengan menggunakan software matlab Simulink r2009a. Output dari penelitan yang dijadikan sebagai bahan untuk pengamatan adalah berupa data mechanical output motor, misalnya saja rotor speed yang semula rotor speed input sebesar 500 rpm namun setelah dilakukan simulasi ternyata hanya mampu mencapai 493 rpm atau mengalami error sebesar 1.4 %.

Kata kunci ; BLDC motor phase current_abc, EMF waveform, electrical torque, rotor speed.

DESIGN OF BLDC MOTOR CONTROLLER FOR INCREASING THE OUTPUT PERFORMANCE (POWER) FROM ELECTRIC BIKE

Name : **NanangMasudi**
NRP : **2111 030 069**
study program : **D-3 TeknikMesin FTI-ITS**
Counselor lecturer : **1. Liza Rusdiyana ST, MT**
: **2. Dr.HendroNurhadi,**
Diplm.Ing., PhD.

Abstract

Brushless dc motors or usually named bldc motors is one of the type of motor that commonly used in industries, either in the field atmosphere, customers, a medical automation, industrial and instrumentation appliances, as well as the automotive field. Motor type Motor Dc It Different With the Usual Motor, Because It Has Three-Phase Motor So To Flow Automation System Requires Lidtrik And Perfect At The Distributed Voltage of Each Phase. In the Final Report will be discussed on the Six-Step Method Switch Mode By Using Software Simulink Matlab r2009a

The Results obtained in the form of a graph such that the data is phase current_abc, EMF waveform, electrical torque, and rotor speed. Based on the virtual simulations has done in research using matlab software Simulink R2009a. the output of this final project is used as material for observation is a mechanical motor output of data, such as the original rotor speed rotor speed of 500 rpm input but after the simulation was only able to reach 493 rpm or an error of 1.4%.

Keywords; Current_abc phase BLDC motors, EMF waveform, electrical torque, rotor speed.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur dipanjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat-NYA, sehingga penyusunan tugas Akhir yang berjudul :

“DESAIN CONTROLLER MOTOR BLDC UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA (DAYA OUTPUT) SEPEDA MOTOR LISTRIK” dapat diselesaikan dengan baik.

Laporan ini disusun sebagai salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS untuk bisa dinyatakan lulus.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis berusaha menerapkan ilmu yang didapat selama menjalani perkuliahan di D3 Teknik Mesin. Kiranya penulis tidak akan mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini tanpa bantuan, saran, dukungan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu Liza Rusdiyana, ST, MT selaku dosen pembimbing, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan ide, arahan, bimbingan dan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini serta tak lupa juga kesabarannya yang sangat besar.
2. Orang tua tercinta Bapak dan Ibu serta adik yang selalu memberikan doa kesuksesan serta dukungan dalam bentuk apapun.
3. Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D selaku dosen pembimbing di Laboratorium Mekatronika dan dosen penguji serta dosen wali yang telah banyak memberikan saran dan masukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

4. Bapak Ir. Suhariyanto, MT selaku Ketua Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.
5. Ibu Liza Rusdiyana, ST, MT selaku koordinator Tugas Akhir.
6. Segenap Bapak/Ibu Dosen Pengajar dan Karyawan di Jurusan D3 Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan banyak ilmu dan pengetahuan selama penulis menuntut ilmu di kampus ITS.
7. Sahabat-sahabat seperjuangan D3 Teknik Mesin 2k11 dan semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, motivasi dan doa kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Teman – teman yang tidak dapat saya sebutkan disini terima kasih atas kerjasama dan bantuan yang telah diberikan sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya, bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari berbagai pihak, yang dapat mengembangkan Tugas Akhir ini menjadi lebih baik. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan mahasiswa, khususnya mahasiswa Program studi Sarjana Teknik Mesin FTI-ITS dan D3 Teknik Mesin FTI-ITS.

Surabaya, 11 Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	
Lembar pengesahan	v
Abstrak indonesia.....	ix
Abstract english.....	xi
Kata pengantar.....	xiii
Daftar isi.....	xv
Daftar gambar.....	xvii
Daftar tabel.....	xix
Daftar simbol.....	xxi

BAB I Pendahuluan

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	4

BAB II, Tinjauan Pustaka

2.1 Brushless DC Motor (BLDC)	5
2.2 Keunggulan motor BLDC.....	5
2.3 Prinsip dasar motor BLDC.....	6
2.4 Konstruksi	8
2.4.1 Rotor	8
2.4.2 Stator.....	9
2.4.3 Sensor hall	11
2.4.4 Controller.....	11
2.5 Bagian-bagian yang terdapat di dalam controller	12
2.5.1 Speed control	12
2.5.2 Inverter.....	13
2.5.3 PWM Module	13
2.6 Prinsip arah putaran motor	16

2.7 Baterai	16
2.7.1 Sel primer.....	17
2.7.2 Sel sekunder.....	19
2.8 Matlab Simulink.....	22
2.8.1 Matlab.....	22
2.8.2 Simulink.....	23
2.8.3 Implementasi komputer	23
2.9 Penelitian yang dilakukan	24
 BAB III, Metodologi Penelitian	
3.1 Spesifikasi motor listrik yang digunakan.....	29
3.2 Software yang digunakan.....	29
3.3 Diagram alir penelitian secara umum	29
3.4 Memahami mekanisme kerja dari motor BLDC.....	35
3.5 Permodelan dengan menggunakan software matlab	36
3.5.1 Speed Controller	36
3.5.2 PWM Module	36
3.5.3 Inverter.....	37
3.6 Rangkaian Simulink diagram motor BLDC.....	38
3.7 Simulasi percobaan	38
 BAB IV, Hasil Dan Pembahasan	
4.1 Konsep penelitian.....	39
4.2 Penentuan nilai input.....	39
4.3 Input data.....	42
4.4 Hasil percobaan.....	43
4.5 Optimasi	52
 BAB V, Penutup	
4.6 Kesimpulan	59
4.7 Saran	60
Daftar Pustaka	61
Lampiran	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perubahan pada Permanent Magnet Synchronous ... Machine (Hasil Analisis)	25
Tabel 2.2 Perubahan Pada Converter dan DC Bus..... (Hasil Analisa)	25
Table 3.1 spesifikasi motor sebagai nilai awal..... input pada model block diagram	38
Tabel 4.1 data spesifikasi motor.....	39
Tabel 4.2 tabel hambatan jenis dari beberapa material pada suhu 20 ⁰ C	41
Tabel 4.3 nilai input yang diperoleh dari karakterisasi melalui perhitungan manual	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 blok diagram motor BLDC.....	6
Gambar 2.2 diagram timing ideal emf dan arus motor BLDC ..	8
Gambar 2.3 rotor BLDC motor	9
Gambar 2.4 stator motor BLDC	10
Gambar 2.5 sensor hall	11
Gambar 2.6 BLDC motor controller	12
Gambar 2.7 sinyal pwm dan rumus perhitungannya	14
Gambar 2.8 pwm dengan 5 macam duty cycle (0%,25%,50%75%, dan 100%)	15
Gambar 2.9 baterai sel primer	18
Gambar 2.10 prinsip operasi baterai ion lithium c/licoo2	21
Gambar 2.11 pemodelan motor dc	24
Gambar 2.12 waveform arus	26
Gambar 2.13 waveform output putaran motor	26
a. Putaran motor actual	
b. Putaran motor setpoint	
Gambar 2.14 perbandingan waveforma.torsi motor actual, b.torsi motor setpoint.....	27
Gambar 2.15 waveform tegangan	27
Gambar 3.1 diagram alir penelitian secara umum.....	29
Gambar 3.2 diagram alir detail penelitian	31
Gambar 3.3 diagram alir proses kerja motor BLDC	34
Motor controller	
Gambar 3.4 simulink model block speed controller.....	35
Gambar 3.5 simulink model block hall decoder.....	35
Gambar 3.6 simulink model block emf decoder	36
Gambar 3.7 simulink model block inverter	36
Gambar 3.8 simulink model block BLDC motor	37
Gambar 4.1 pwm signal dari hasil olah data	43
pada modul hall decoder	
Gambar 4.2 aliran arus listrik yang masuk	44
dari sumber arus ke motor	
Gambar 4.3 grafik rotor speed.....	45

Gambar 4.4 grafik rotor speed yang diperbesar	46
Dalam range waktu 7×10^{-4} - 7.5×10^{-4} detik	
Gambar 4.5 grafik torsi output	47
Gambar 4.6 torsi output yang diperbesar	48
dalam range waktu 2.45×10^{-5} - 2.5×10^{-5} detik	
Gambar 4.7 grafik stator current	49
Gambar 4.8 stator current yang diperbesar.....	50
dalam range waktu 1.75×10^{-4} - 2×10^{-4} detik	
Gambar 4.9 grafik bembf	51
Gambar 4.10 grafik bembf diperbesar dengan	52
range waktu 5.55 - 5.65×10^{-4} detik	
Gambar 4.11 grafik output torque	53
Gambar 4.12 grafik rotor speed hasil optimasi	54
Gambar 4.13 grafik rotor speed yang diperbesar pada.....	55
Range waktu 0.5×10^{-4} detik- 1.5×10^{-4} detik	
Gambar 4.14 stator current.....	56
Gambar 4.14 grafik rotor speed yang diperbesar	56
Pada range waktu 1.7×10^{-5} - 2×10^{-5} detik	

DAFTAR SIMBOL

- θ_r = sudut rotor
L = inductansi rotor (henry)
 ω_r = putaran rotor (rad/sec)
R = resistance (ohm)
u = voltage (volt)
i = arus listrik (Ampere)
 ν = vector
 T_m = torsi mekanik (Nm)
 T_e = torsi elektrik (Nm)
 Φ = flux (V.s)
e = BEMF (Volt)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin canggih, inovasi baru mulai bermunculan, tak terkecuali pada bidang alat transportasi. Kendaraan yang ramah lingkungan menjadi salah satu trend di mata kostruktor alat transportasi didunia untuk berlomba-lomba dalam pengembangan teknologi alat transportasi, baik itu kendaraan roda empat maupun kendaraan roda dua, yang berbasis teknologi hybrid ataupun elektrik.

Hal ini dipicu oleh isu global warming yang dihasilkan oleh alat transportasi konvensional yang mendominasi sebagian besar dari penyebab terjadinya efek dari global warming. Selain tidak ramah lingkungan, pemakaian bahan bakar fosil yang tidak terkontrol dapat mengakibatkan sebagian besar cadangan minyak bumi lama kelamaan akan habis.

Dalam tugas akhir ini akan dilakukan Desain dan analisis numeric untuk *controller* sepeda motor listrik dengan motor BLDC (*brushless DC Motor*). Motor BLDC dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dari pada motor DC biasa, keunggulan-keunggulan tersebut antara lain adalah; tidak menggunakan sikat (*brush*), efisiensi lebih tinggi, hampir tidak menimbulkan suara, tahan lama, dan masih banyak lagi keunggulan yang lainnya.

Selain keunggulan-keunggulan diatas, motor BLDC juga memiliki satu ciri khas lain dimana terdapat *controller* yang bertugas untuk mendistribusi arus dan *voltage*, sesuai dengan kebutuhan untuk satu kali putaran-nya. Untuk memperoleh performa motor listrik dan pengendalian yang optimal. Parameter input pada unit control merupakan salah satu cara untuk meningkatkan performance dari motor BLDC. Simulasi percobaan dilakukan secara virtual untuk memperoleh data aktual berdasarkan perhitungan yang menggunakan referensi yang terpercaya, sehingga output yang diinginkan sesuai dengan kondisi riil dari kemampuan motor itu sendiri.

1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian singkat dan latar belakang, maka diperoleh perumusan masalah sebagai berikut :

- 1 Apa saja pengaruh yang terjadi ketika parameter input yang digunakan diubah dengan variable yang berbeda
- 2 Apa saja output yang dapat diperoleh untuk implementasi optimasi pada motor bldc untuk keperluan peningkatan performa (output daya) dari sepeda motor listrik yang sudah ada

1.3 Tujuan

Dari persamaan masalah diatas, tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh yang terjadi pada motor BLDC ketika terjadi perubahan parameter yang digunakan terhadap output daya motor, yang dapat dihitung dari output motor berupa *phase current_abc*, *EMF*, *electrical torque*, dan *rotor speed*, melalui simulasi percobaan secara virtual didalam software.
2. Memperoleh hasil output berupa data numeric *controller* Motor BLDC yang sesuai dengan kebutuhan optimasi.

1.4 Batasan Masalah

1. Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan motor dengan jenis *permanent magnet brushless dc motor (PMBLDCM)* 700 w
2. Sumber energy listrik yang digunakan adalah berupa batrey (*accumulator*) 12V yang dirangkai seri menjadi 48V.
3. Penelitian dilakukan untuk memperoleh *numerical design* dari *controller permanent magnet brushless dc motor*
4. Penelitan dilakukan dengan menggunakan parameter dari karakterisasi yang diperoleh dari hasil pengujian LCR pada penelitan sebelumnya.
5. Penelitan dilakukan dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK R2009a
6. Hasil yang diperoleh berupa data grafik yang diperoleh dari simulasi model block yang dibuat didalam software matlab Simulink R2009a
7. Untuk model block motor digunakan *Model Block Permanent Magnet Synchronous Brushless Dc Motor* yang terdapat pada *Simulink library*
8. Penelitian dilakukan untuk memeproleh hasil berupa data peak performance (*rotor speed, back EMF, torque motor*)
9. Tidak dilakukan uji jalan
10. Asumsi efisiensi yang digunakan adalah 90%

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan laporan tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh yang terjadi pada motor BLDC ketika terjadi perubahan parameter yang digunakan terhadap output daya motor melalui simulasi didalam software.
2. Memperoleh hasil output berupa data numeric *controller* Motor BLDC yang sesuai dengan kebutuhan.
3. Menjadi referensi bagi penulis lainnya sebagai acuan percobaan di waktu yang akan datang

1.6 Sistematika penulisan

- **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bagian ini diuraikan latar belakang, pepersamaan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan

- **BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Pada bagian ini diuraikan beberapa landasan teori dan hasil penelitian sebelumnya.

- **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bagian ini akan diuraikan metode penelitian, spesifikasi peralatan yang akan dipakai dalam pengujian, cara pengujian, dan data yang diambil.

- **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dalam bab ini dibahas tentang perhitungan dan analisis dari data yang didapat dari hasil penelitian.

- **BAB V PENUTUP**

Pada bagian ini berisi kesimpulan hasil penelitian serta saran-saran konstruktif untuk penelitian selanjutnya.

- **DAFTAR PUSTAKA**

Pada bagian ini berisi sumber sumber yang didapatkan dalam penulisan buku tugas akhir ini.

- **LAMPIRAN**

Pada bagian ini terdapat gambar-gambar ataupun data-data penting yang tidak dilampirkan didalam kelima bab diatas

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Brushless DC Motor (BLDC)

Motor DC tanpa sikat atau disebut juga dengan motor *Brushless DC motor (BLDC Motor)* merupakan salah satu jenis motor-sinkron. Dimana medan magnet yang dihasilkan oleh rotor dan stator pada frekwensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami Slip, seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai magnet permanent pada "rotor" sedangkan pada bagian stator-nya. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian sederhana (*simple computer system*), maka kita dapat merubah arus eletro-magnet yang dihasilkan oleh motor ketika bagian rotor-nya berputar.

Motor BLDC sering digunakan dalam berbagai bidang seperti; industry otomotif, kesehatan maupun bidang otomasi robotic. Motor BLDC mempunyai banyak keuntungan dibandingkan dengan DC motor dan Motor induksi biasa. Motor *Brushless DC (BLDC)* adalah pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan keandalan yang tinggi, efisiensi tinggi, dan rasio power-volume yang tinggi.

2.2 Keunggulan motor BLDC

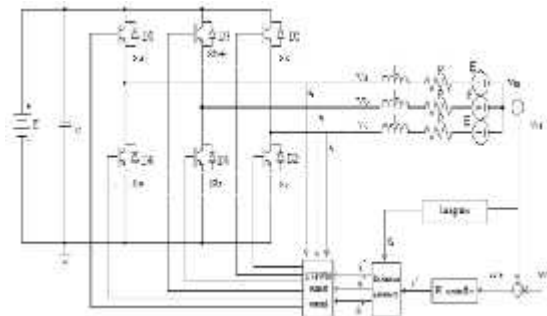
- *High Speed Operation*, Sebuah motor BLDC dapat beroperasi pada kecepatan di atas 10.000 rpm dalam kondisi *loading* dan *unloading*.
- *Responsif & acceleration*, rotor Brushless DC motor memiliki inersia rotor rendah, yang memungkinkan motor ini untuk mempercepat, mengurangi kecepatan, dan membalik arah dengan cepat.
- *High Power Density*, motor BLDC memiliki torsi berjalan tertinggi per inci kubik dari pada motor DC lainnya.
- *Keandalan tinggi*, motor BLDC tidak memiliki sikat, sehingga motor jenis ini memiliki ketahanan dan *lifetime* yang cukup tinggi hingga mencapai 10.000 jam pemakaian. Hal ini menjadikan motor jenis ini sangat jarang sekali dilakukan penggantian atau perbaikan secara menyeluruh.

Selain itu terdapat keunggulan-keunggulan lain yaitu:

- Kecepatan yang lebih baik untuk melawan karakteristik tenaga putaran
- Efisiensi tinggi
- Tahan lama atau usia pakainya lebih lama
- Nyaris tanpa suara bila dioperasikan

2.2 Prinsip dasar motor BLDC

prinsip kerja dari motor BLDC memiliki konstruksi yang berbeda dengan motor dc pada umumnya, dimana motor ini memiliki tiga fasa yang berbeda sehingga masing-masing fasa memiliki sudut sebesar 120^0 , sehingga motor BLDC menggunakan hall effect yang digunakan untuk mendeteksi posisi dimana rotor berada dengan menggunakan signal dari komutasi motor



Gambar 2.1 blok diagram motor BLDC

(sumber: *International Journal of Computer Applications-A Novel Current Controlled Space Vector Modulation based Control Scheme for Reducing Torque Ripple in Brushless DC Drives*)

$$\begin{matrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{matrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

output motor berupa *electric torque* diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2.2)$$

Dimana ω_r diperoleh dari perhitungan:

$$\frac{d}{dt} n_r = \frac{1}{J} (T_E - T_L - E \omega_r) \quad (2.3)$$

Untuk menghitung *electrical frequency* jika dihubungkan dengan P (jumlah pole) maka diperoleh fungsi:

$$n_e = P n_r \quad (2.4)$$

EMF (*electromotive force*) adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan., dimana diagram timing EMF ideal dapat ditunjukkan pada gambar 3.4. Untuk mengetahui berapa besar EMF pada masing–masing fasa, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut;

$$\begin{aligned} e_a &= f_a \theta_r \lambda_p n_m \\ e_b &= f_b \theta_r \lambda_p n_m \\ e_c &= f_c \theta_r \lambda_p n_m \end{aligned} \quad (2.5)$$

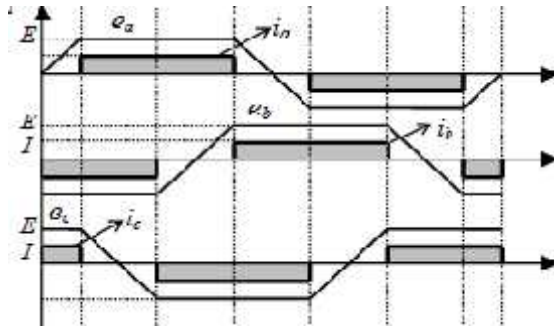
Dimana ;

$$\begin{aligned} f_a &= \begin{cases} 1 & 0 < r < \pi/3 \\ -\frac{1}{2} & \pi/3 < r < 2\pi/3 \\ -1 & 2\pi/3 < r < \pi \\ 1 & \pi < r < 4\pi/3 \\ -\frac{1}{2} & 4\pi/3 < r < 5\pi/3 \\ 1 & 5\pi/3 < r < 2\pi \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Shingga untuk memperoleh f_{c_r} dan f_{c_r} dapat menggunakan persamaan sebagai berikut;

$$f_{b_r} = f_a \theta_r + \frac{2\pi}{3} \quad (2.7)$$

$$f_{c_r} = f_a \theta_r - \frac{2\pi}{3} \quad (2.8)$$



Gambar 2.7 Diagram timing ideal

EMF dan arus motor BLDC

(sumber; *Journal of Basic and Applied Scientific Research*
Improving the Performance of Brushless DC Motor Using the
Six Digits form of SVPWM Switching Mode)

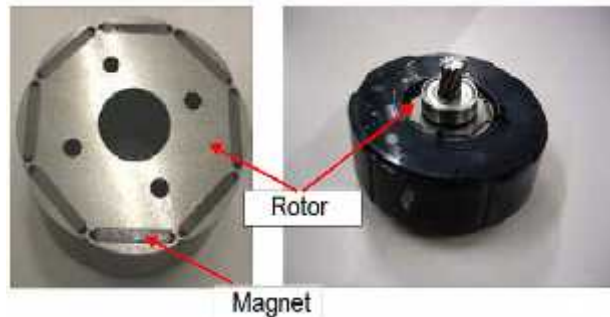
2.3 Konstruksi

Setiap motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor (bagian berputar) dan stator (bagian stasioner). Bagian penting lainnya dari motor adalah gulungan stator dan magnet rotor.

2.3.1 Rotor

Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC *brushless* bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *brushes* (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub

magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam “epoxy” dan tidak ada *brushes*-nya.



Gambar 2.3 rotor BLDC motor

Rotor dibuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub Magnet Utara(N) atau Selatan(S). Material magnetis yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus pula. Biasanya magnet ferrit yang dipakai untuk membuat magnet tetap. Tetapi dewasa ini dengan kemajuan teknologi, campuran logam sudah kurang populer untuk digunakan. Benar sekali magnet Ferrit lebih murah, tetapi material ini mempunyai kekurangan yaitu flux density yang rendah untuk ukuran volume material yang diperlukan untuk membentuk rotor.

2.3.2 Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam/statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC *brushless* statornya terdiri dari 12 lilitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC *brushless* terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan

pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2.4 stator motor BLDC

Lilitan stator pada motor DC brushless terdiri dari dua jenis, yaitu lilitan stator jenis trapezoidal dan jenis sinusoidal. Yang menjadi dasar perbedaan kedua jenis lilitan stator tersebut terletak pada hubungan antara koil dan lilitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (Electro Motive Force) balik yang berbeda.

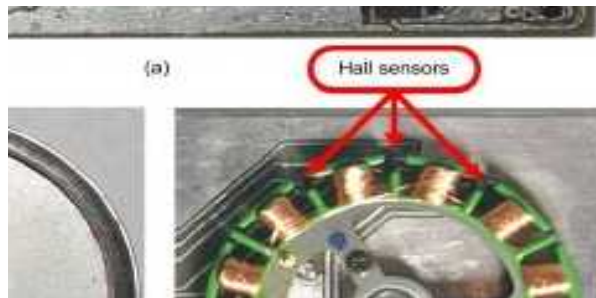
EMF balik sendiri adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan.

Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan. Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan lebih besar dari tegangan potensial pada lilitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun dan torsi pun akan ikut turun.

Karena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

2.3.3 Sensor Hall

Tidak seperti motor DC *brushed* komutasi dari motor DC *brushless* diatur secara elektronik agar motor dapat berputar, stator harus di-*energize* secara berurutan dan teratur. Sensor hall inilah yang berperan dalam mendeteksi pada bagian rotor mana yang ter-*energize* oleh fluks magnet sehingga proses komutasi yang berbeda (enam step komutasi) dapat dilakukan oleh stator dengan tepat karena sensor hall ini dipasang menempel pada stator.



Gambar 2.5 sensor hall

2.3.4 Controller

Controller dan *Inverter* (perubah tegangan DC menjadi AC) *Controller* pada motor DC *brushless* berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor DC *brushless* karena motor DC *brushless* membutuhkan suatu trigger pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor DC *brushless* untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat.

Inverter pada motor DC *brushless* berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk *controller* menjadi tegangan AC karena jenis motor DC *brushless* biasanya memiliki multipole tiga phase maka dibutuhkan inverter tiga phase tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar.

Berdasarkan kemampuan *control power supply*, kita dapat memilih dengan tepat rating tegangan untuk motor yang

dibutuhkan. Untuk tegangan 48 volt atau kurang dari itu, biasanya digunakan untuk bidang otomotif, robotic atau penggerak lengan mekanik kecil. Untuk rating tegangan 100 volt atau lebih digunakan dalam bidang otomasi industri dan penggerak alat-alat industri.



Gambar 2.5 BLDC motor controller

2.4 BAGIAN-BAGIAN YANG TERDAPAT DIDALAM CONTROLLER

Controller merupakan salah satu bagian dari motor BLDC yang paling vital, dimana semua parameter input diolah pada bagian ini, terdapat beberapa modul penting yang terdapat didalam controller sebagai berikut;

2.4.1 SPEED CONTROL

Speed control merupakan salah satu unit dari *controller* Motor BLDC. Pada penelitian kali ini speed control yang diunakan adalah menggunakan basic algoritma dari algoritma *PID control*. Seperti namanya, algoritma PID terdiri dari tiga mode dasar, mode Proporsional, Integral dan Derivatif mode. Ketika menggunakan algoritma ini perlu untuk memutuskan mana mode yang akan digunakan (P, I atau D), kemudian tentukan parameter (atau pengaturan) untuk setiap mode yang

digunakan. Umumnya, tiga algoritma dasar yang digunakan P, PI atau PID.

2.4.2 INVERTER

Inverter merupakan salah satu modul yang terdapat didalam *controller* motor BLDC yang mana berfungsi untuk mengubah arus listrik dari baterai yang berupa arus DC menjadi arus AC, dikarenakan motor BLDC memiliki karakteristik multipole.

Didalam inverter terdapat komponen kelistrikan utama yaitu berupa diode. Terdapat beberapa jenis diode yang sering digunakan yaitu IGBT Diode, GTO Diode dan MOSFET Diode. Distribusi voltage diatur oleh diode yang terhubung dengan PWM, dimana signal yang telah di distribusi di dalam modul PWM dialirkan kedalam diode melalui gate yang dimiliki oleh komponen ini, yang kemudian dialirkan diteruskan ke masing-masing fasa motor baik v_a , v_b , maupun v_c sesuai dengan kebutuhan

$$v_{no} = \frac{v_a + v_b + v_c - e_a - e_b - e_c}{3} \quad (2.9)$$

kemudian kita hitung v_a , v_b dan v_c dengan menggunakan persamaan berikut:

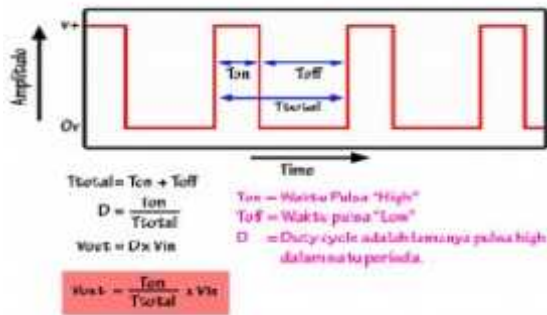
$$\begin{aligned} v_a &= v_{ao} - v_{no} \\ v_b &= v_{bo} - v_{no} \\ v_c &= v_{co} - v_{no} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.4.3 PWM MODULE

Pulse Width Modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, audio

effect dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya. Aplikasi PWM berbasis mikrokontroler biasanya berupa pengendalian kecepatan motor DC, pengendalian motor servo, pengaturan nyala terang LED dan lain sebagainya.

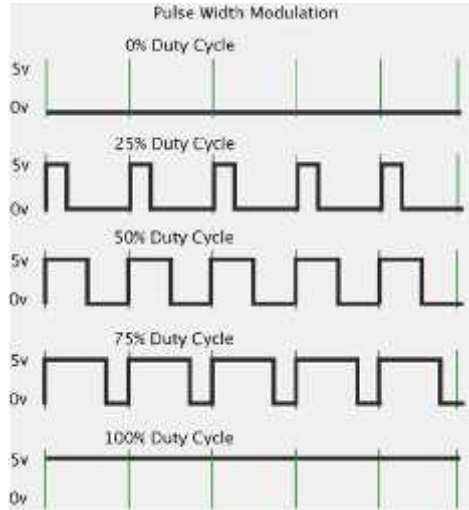
Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar Pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, Sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun duty cycle bervariasi (antara 0% hingga 100%).



Gambar 2.7 Sinyal PWM dan rumus perhitungannya
 Sumber; http://andri_mz.staff.ipb.ac.id/pulse-width-modulation-pwm/

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan salah satu teknik untuk mendapatkan signal analog dari sebuah piranti digital. Sebenarnya Sinyal PWM dapat dibangkitkan dengan banyak cara, dapat menggunakan metode analog dengan menggunakan rangkaian op-amp atau dengan menggunakan metode digital. Dengan metode analog setiap perubahan PWM-nya sangat halus, sedangkan menggunakan metode digital setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri. Resolusi adalah jumlah variasi perubahan nilai dalam PWM

tersebut. Misalkan suatu PWM memiliki resolusi 8 bit berarti PWM ini memiliki variasi perubahan nilai sebanyak $2^8 = 256$ variasi mulai dari 0 – 255 perubahan nilai yang mewakili duty cycle 0 – 100% dari keluaran PWM tersebut.



*Gambar 2.8 PWM dengan 5 macam Duty Cycle
(0%,25%,50%75%, dan 100%)*

Sumber;

<http://kecoakacau.blogspot.com/2011/02/membangkitkan-pwm-dengan-mikrokontroler.html>

Pwm dengan duty cycle 25% dengan periode katakanlah 100ms maka berarti sinyal logika 1 pada pwm tersebut adalah 25% dari keseluruhan periode sinyal atau 25% dari 100ms = 25ms, sedangkan untuk sinyal logika 0 pada pwm tersebut adalah sisanya atau 75 ms.

2.5 BATERAI

Baterai adalah salah satu alat penting untuk penyimpanan dan konversi energi yang bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia. Jadi, baterai sebenarnya merupakan sebuah sel elektrokimia.

Berdasarkan cara kerjanya, sel elektrokimia dapat dibagi menjadi dua, yaitu: sel galvanis dan sel elektrolisa. Sel galvanis, yang juga disebut sel volta, merubah energi kimia menjadi kerja listrik sedangkan sel elektrolisa merubah kerja listrik untuk menggerakkan reaksi kimia tak spontan. Dalam baterai biasa, komponen kimia terkandung dalam alat itu sendiri. Jika reaktan dipasok dari sumber luar ketika dikonsumsi, alat ini disebut sel bahan bakar (*fuel cell*).

Komponen utama sebuah baterai terdiri dari dua bahan konduktor tak sejenis (elektroda) yang dicelupkan dalam larutan yang mampu menghantarkan listrik (elektrolit). Salah satu elektroda akan bermuatan listrik positif dan yang lain negatif. Ujung elektroda yang menonjol diatas elektrolit dikenal sebagai terminal positif dan terminal negatif. Ketika kedua terminal dihubungkan dengan kawat konduktor (mis.: tembaga), arus listrik akan mengalir melalui kawat dari terminal negatif ke positif. Beda potensial atau tekanan listrik antar terminal tergantung pada bahan elektroda dan elektrolit dan diukur dalam volt.

Dalam pemakaiannya, baterai ada yang tidak bisa diisi ulang dan ada yang bisa diisi ulang. Jenis baterai yang tidak bisa diisi ulang disebut baterai primer dan yang bisa diisi ulang disebut baterai sekunder.

2.5.1 Sel primer

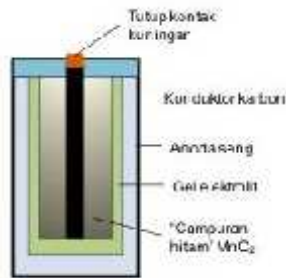
Pada baterai kering yang biasa kita gunakan, elektroda terdiri dari batang karbon positif pada pusat sel dan bejana seng negatif dengan elektrolit jeli ammonium khlorida. Potensial sel kira-kira 1,5 volt. Selama pemakaian, seng secara perlahan-lahan larut ketika arus listrik dihasilkan. Ketika ammonium khlorida jenuh, aliran arus listrik berhenti dan sel harus dibuang. Sel seperti itu dikatakan primer atau tak dapat diisi ulang.

Contoh baterai yang diuraikan diatas adalah baterai tipe karbon-seng. Tipe baterai yang lebih maju adalah baterai alkaline-mangan dioksida. Baterai ini pertama kali diperkenalkan dipasar tahun 1959. Sejak itu, jenis baterai ini

telah mendominasi pasar baterai portabel. Hal ini karena sistem alkaline dikenal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan baterai tipe karbon-seng. Beberapa keunggulan kimia alkaline dibandingkan kimia karbon-seng dasar adalah:

- Densitas energi lebih tinggi
- Kinerja pelayanan lebih unggul pada semua laju pemakaian
- Kinerja suhu dingin lebih unggul
- Hambatan internal lebih rendah
- Umur lebih lama
- Hambatan lebih besar terhadap kebocoran

Baterai alkaline silinder dibuat dengan anoda seng dengan luas permukaan besar, katoda mangan dioksida dengan densitas tinggi dan elektrolit potasium hidroksida. Potongan melintang baterai silinder alkaline diilustrasikan pada diagram dibawah:



Gambar 2.9 baterai sel primer

Baterai alkaline menghasilkan listrik ketika katoda mangan dioksida direduksi dan anoda seng dioksidasi. Persamaan untuk reaksi sel alkaline sederhana adalah:



Selama reaksi ini, air (H_2O) dikonsumsi dan ion hidroksil (OH^-) dihasilkan oleh katoda MnO_2 menurut reaksi:



Pada saat yang sama, anoda mengonsumsi ion hidroksil dan menghasilkan air:



Elektron (e) yang dihasilkan selama reaksi digunakan untuk memberi daya alat. Laju reaksi tergantung pada kualitas bahan baku dan ketersediaan air dan ion hidroksil selama reaksi. Sebuah baterai dirancang untuk menjaga katoda dan anoda terpisah untuk mencegah terjadinya reaksi. Elektron yang disimpan hanya akan mengalir ketika sirkuit tertutup. Ini terjadi ketika baterai dipasang pada alat dan alat dinyalakan. Prinsip ini sama seperti menyalakan dan mematikan saklar lampu di rumah.

Ketika sirkuit tertutup, tarikan yang lebih kuat pada elektron oleh mangan dioksida akan menarik elektron dari elektroda anoda seng melalui kawat dalam sirkuit ke elektroda katoda. Aliran elektron melalui kawat ini adalah listrik dan dapat digunakan untuk aplikasi daya.

2.5.2 Sel sekunder

Sel asam timbal, yang biasanya disebut aki, termasuk dalam kelompok yang disebut sel sekunder atau dapat diisi ulang. Disini, elektroda adalah timbal dioksida positif dan timbal spons negatif dengan elektrolit asam sulfat encer. Selama pemakaian, arus listrik mengalir dan elektroda positif dan negatif berubah menjadi timbal sulfat dan menyerap ion sulfat dari elektrolit dengan mereduksinya menjadi air. Tidak seperti sel kering, sel asam timbal adalah reversibel dan bisa dikembalikan ke keadaan asalnya dengan mengalirkan listrik melalui sel dalam arah yang berlawanan dari mana dilepaskan. Ini membalik reaksi dalam sel, merubah timbal sulfat dalam pelat kembali ke bahan aktif asal dan mengembalikan ion sulfat ke elektrolit.

Sel asam timbal memiliki potensial kira-kira 2 volt, berapapun ukurannya. Sel yang lebih besar akan memiliki kapasitas yang lebih tinggi dan mengirimkan arus listrik yang sama untuk waktu yang lebih lama atau arus listrik lebih tinggi untuk periode yang sama daripada sel yang lebih kecil. Sel bisa dihubungkan seri (negatif dari salah satu sel ke positif dari sel berikutnya) agar memberikan tegangan yang lebih tinggi. Jadi tiga sel yang dihubungkan seri akan memberikan baterai sel

yang memiliki tegangan nominal 6 volt. Enam sel sejenis yang dihubungkan seri akan menghasilkan baterai 12 volt.

Jenis baterai sekunder lain adalah baterai ion lithium, yang saat ini dipandang memiliki densitas energi dan densitas daya paling besar. Baterai ini diharapkan menjadi sumber energi masa depan untuk berbagai keperluan termasuk mobil listrik.

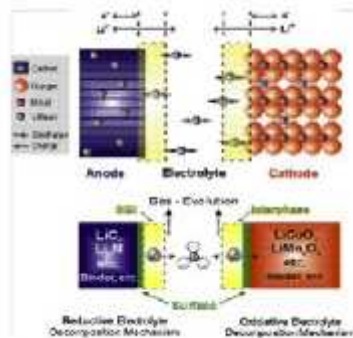
Baterai adalah sel elektrokimia (juga dikenal sebagai sel Galvanis) yang merubah energi kimia menjadi energi listrik, yang terdiri atas anoda dan katoda yang dipisahkan oleh elektrolit. Elektrolit adalah penghantar ion yang berfungsi juga sebagai media pengisolasi elektron. Elektron dihasilkan pada anoda dan mengalir kearah katoda melalui sirkuit luar sementara, pada saat yang sama, elektronetralitas dijamin oleh perpindahan ion melewati elektrolit.

Banyak tipe baterai yang telah dikembangkan dan digunakan secara luas, salah satunya adalah baterai ion lithium. Baterai ion lithium, pertama kali dipasarkan oleh Sony pada awal 1990an, adalah tipe paling umum sel sekunder (dapat diisi ulang) dan dijumpai dalam hampir semua alat elektronik portabel. Baterai jenis ini diharapkan mampu menyelesaikan permasalahan global yang lebih besar terkait dengan kebutuhan energi yang terus meningkat dan adanya tuntutan energi bersih.

Elektrokimia berbasis lithium menawarkan beberapa ciri yang menonjol. Salah satunya adalah lithium merupakan unsur logam paling ringan dan memiliki potensial redoks sangat rendah [$E(\text{Li}^+/\text{Li}) = -3,04 \text{ V vs SHE}$], yang memungkinkan sel memiliki tegangan tinggi dan densitas energi besar. Selain itu, ion Li^+ memiliki jari-jari ion kecil yang menguntungkan untuk difusi dalam padatan. Dipasangkan dengan umur siklusnya yang lama dan kemampuan kecepatan, sifat ini telah memungkinkan teknologi ion lithium menangkap pasar elektronik portabel.

Dengan ciri diatas, baterai ion lithium merupakan baterai yang ringan dan kompak, beroperasi dengan tegangan sel -4 V dengan energi spesifik dalam kisaran 100-180 Wh/kg. Pada tipe baterai ini anoda dan katoda adalah bahan dimana, dan dari mana, ion lithium bermigrasi melalui elektrolit, kemudian

disisipkan (proses interkalasi) dan diekstraksi (proses deinterkalasi) kedalam elektroda (Gambar 1). Anoda yang umum digunakan adalah grafit, mis.: mesocarbon microbeads, dengan katoda oksida logam lithium, mis.: LiCoO_2 . Elektrolit yang umum digunakan adalah garam lithium, mis.: lithium hexafluorophosphate, dalam pelarut organik, mis.: ethylene carbonate-dimethyl carbonate yang dipisahkan oleh membran.



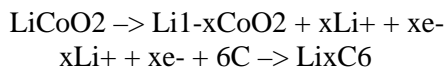
Gambar 2.10 Prinsip operasi baterai ion lithium C/LiCoO₂.

Jadi, ketika baterai ion lithium dipakai, Li diekstraksi dari anoda (kutub $-$) dan disisipkan kedalam katoda (kutub $+$). Proses sebaliknya terjadi ketika baterai diisi mengikuti reaksi berikut:



dimana $x = 0,5$, $y = 6$, $V_{\text{sel}} = 3,7 \text{ V}$

Untuk kasus LiCoO_2 :



Reaksi overall adalah:

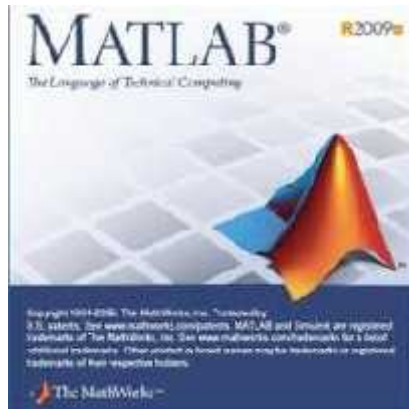


Selama pengisian ulang ion Li^+ dipisahkan dan oksidasi Co^{3+} menjadi Co^{4+} terjadi. Pasangan $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{4+}$ memasok tegangan sel kira-kira $4,0 \text{ V}$ vs logam Li.

2.6 Matlab Simulink

2.6.1 Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya, program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan menggunakan bahasa FORTRAN namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan assembler (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB).



MATLAB telah berkembang menjadi sebuah *environment* pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus. MATLAB bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada *library* ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu.

MATLAB (Matrix Laboratory) yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dll. Sehingga Matlab banyak digunakan pada:

- Matematika dan Komputansi
- Pengembangan dan Algoritma
- Pemrograman Modeling, Simulasi, dan Pembuatan Prototipe
- Analisa Data , Eksplorasi dan Visualisasi
- Analisis Numerik dan Statistik
- Pengembangan Aplikasi Teknik

2.6.2 Simulink

Simulink merupakan bagian tambahan dari software MATLAB (Mathworks Inc.). Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisa dari sistem dinamik dengan menggunakan ntarmuka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan toolbox yang dapat digunakan untuk analisa sistem linier dan non-linier. Beberapa library yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain math, sinks, dan sources

2.6.3 IMPLEMENTASI KOMPUTER

Pemakaian komputer sebagai pengolah data, penyimpanan data dan komunikasi informasi tidak dapat diabaikan dalam pendekatan system, model abstrak diwujudkan dalam berbagai bentuk persamaan, diagram alir dan diagram blok. Tahap ini seolaholah membentuk model dari suatu model, yaitu tingkat abstraksi lain yang ditarik dari dunia nyata. Hal yang penting di sini adalah memilih teknik dan bahasa computer yang digunakan untuk implementasi model. Masalah ini akan mempengaruhi:

1. Ketelitian dari hasil komputasi
2. Biaya operasi model
3. Kesesuaian dengan komputer yang tersedia
4. Efektifitas dari proses pengambilan keputusan yang akan menggunakan hasilpemodelan tersebut.

Setelah program komputer dibuat dan format input /output telah dirancang secara memadai, maka sampailah pada tahap pembuktian (verifikasi) bahwa model komputer tersebut mampu melakukan simulasi dari model abstrak yang dikaji.

Pengujian ini mungkin berbeda dengan uji validitas model itu sendiri.

2.7 PENELITIAN YANG TELAH DILAKUKAN

Perencanaan desain motor DC dilakukan menggunakan program symulink pada MATLAB 2009a. Namun melalui beberapa penyesuaian yang harus dilakukan karena ada beberapa parameter yang harus diganti untuk mendapatkan parameter yang sesuai dengan motor DC yang dimiliki.



Gambar 2.12 Pemodelan Motor DC

Hasil Karakterisasi dan Pengisian parameter Dari semua Hasil eksperimen dan penghitungan secara numeric di dapat data sebagai berikut :

L	= $0,51 \times 10^{-3}$ H
R	= 0,156
RPM	= 500
T	= 15,28 Nm
P	= 6 pasang

Maka parameter tersebut di masukkan parameter motor DC yang telah ada. Adapun perubahannya adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Perubahan pada Permanent Magnet Synchronous Machine (Hasil Analisis)

NO	Bagian pada Motor DC	Parameter	Nilai Awal	Nilai Perubahan	Satuan
1.	Equivalent Circuit Parameters	Resistance	0,2	0,156	Ohm
2.	Equivalent Circuit Parameters	Inductance	$8,5 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	Henry
3.	Rotor Values	Pole pairs	4	6	pasang

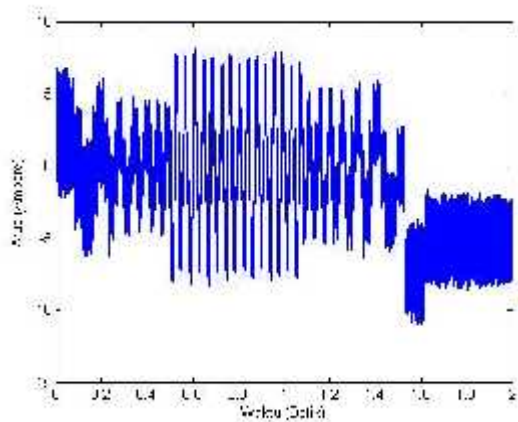
Table 2.2 Perubahan Pada Converter dan DC Bus (Hasil Analisa)

No	Bagian Pada Motor DC	Parameter	Nilai awal	Nilai yang telah diganti	Satuan
1	Switches	Device type	IGBT/Diodes	MOSFET/Diodes	
2	Forward Voltage	Main Device	0,8	-	Volt
3	Forward Voltage	Diode	0,8	-	Volt
4	Turn-off characteristic	Fall time	1×10^{-6}	-	Detik
5	Turn off Characteristic	Tail Time	2×10^{-6}	-	Detik

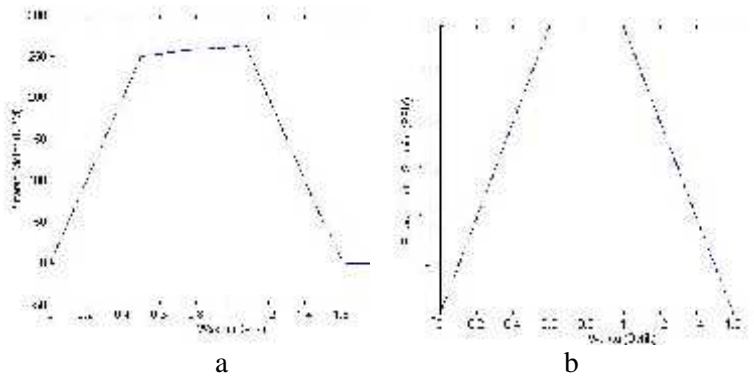
Tabel 2.3 Perubahan Pada *Controller* (Hasil Analisa)

No	Bagian pada Motor DC	Parameter	Nilai Awal	Nilai yang diganti	Satuan
1.	Speed Ramps	Acceleration	1000	500	Rpm
2.	Speed ramps	Deceleration	1000	500	Rpm

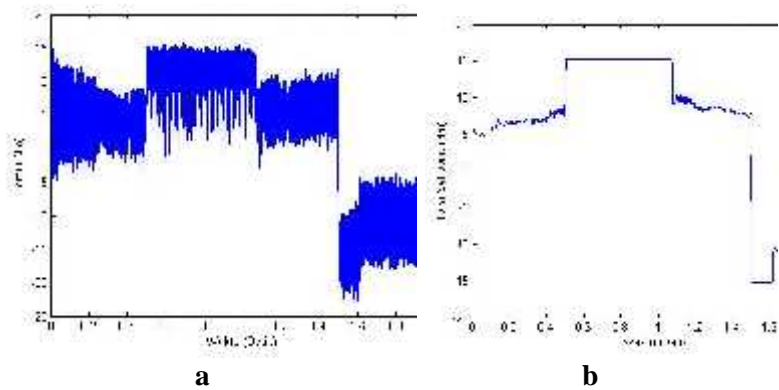
3.	Torque outputs limits	Negative	17,8	15,27	Nm
4.	Torque Output Limits	Positive	17,8	15,27	Nm



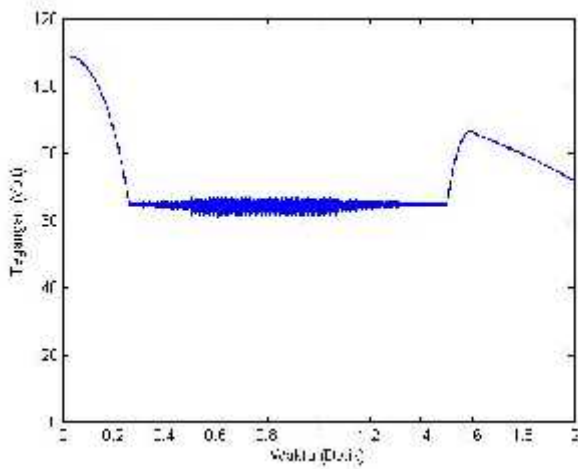
Gambar 2.13 waveform arus



Gabar 2.14 waveform putaran motor actual dan putaran motor setpoint



*Gambar 2.15 perbandingan waveform, a.torsi motor actual
b.torsi motor setpoint*



Gambar 2.16 waveform tegangan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Spesifikasi Motor Listrik Yang Digunakan

Motor listrik yang digunakan adalah motor listrik dengan spesifikasi:

1. motor listrik DC brushless 48V / 800W
 - diameter : 26 cm
 - Voltage : 48 Volt
 - Frekuensi : 60 Hz
 - RPM : 500
 - Daya : 800 Watt



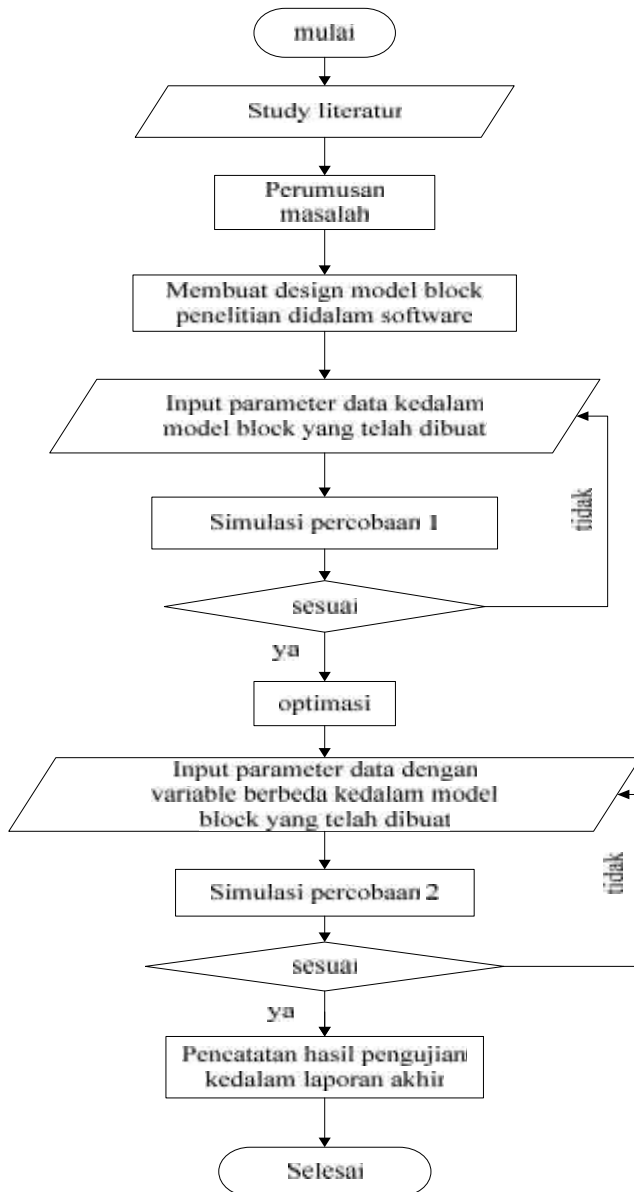
2. unit control An Jiu (48V/800W pole angle 120^0)
3. baterai 12 V

3.2 Software Yang Digunakan

Software yang digunakan untuk melakukan perhitungan pada penelitian kali ini adalah MATLAB SIMULINK R2009a

3.3 Diagram Penelitian

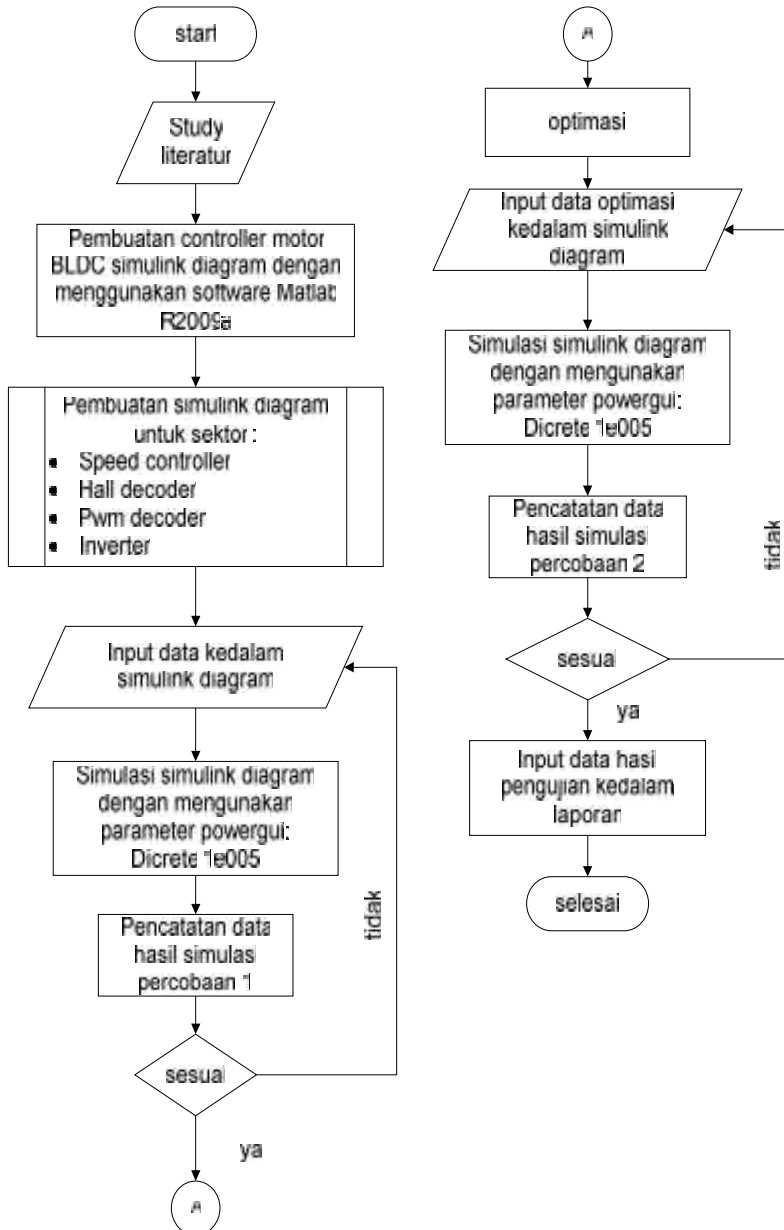
Dalam Penelitian sepeda motor listrik kali ini bertujuan untuk mencari metode yang terbaik untuk optimasi performance dari sepeda motor listrik yang telah ada, sistematika penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum

Penjelasan diagram alir penelitian secara umum

- a. Langkah pertama sebelum melakukan percobaan adalah melakukan studi literature untuk memperoleh segala informasi atau petunjuk untuk mengarahkan penelitian sesuai dengan konsep yang diinginkan
- b. Membuat sebuah rumusan masalah agar konsep penelitian berjalan secara structural
- c. Langkah selanjutnya adalah membuat design sesuai dengan konsep penelitian didalam software
- d. Kemudian pengujian atau simulasi dengan memasukkan parameter dengan nilai awal (berdasarkan hasil karakterisasi yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya)
- e. Langkah berikutnya adalah pencatatan hasil pengujian, apakah sesuai dengan hasil yang diinginkan
- f. Setelah pengujian pertama selesai, dilakukan tahap optimasi, pada tahap ini dimaksudkan untuk mencari output yang lebih baik dari pada pengujian pertama, dengan memasukkan parameter input dengan variable yang berbeda
- g. Hasil pengujian kedua kemudian dicatat untuk kemudian dilihat perbandiingannya dengan percobaan pertama, apakah lebih baik atau lebih buruk
- h. Jika hasil yang diperoleh tidak memuaskan kemudian dilakukan input parameter dengan variable yang berbeda hingga diperoleh hasil yang optimum
- i. Setelah semua selesai kemudian dilakukan pencatatan hasil kedalam laporan akhir



Gambar 3.2 diagram alir detail penelitian

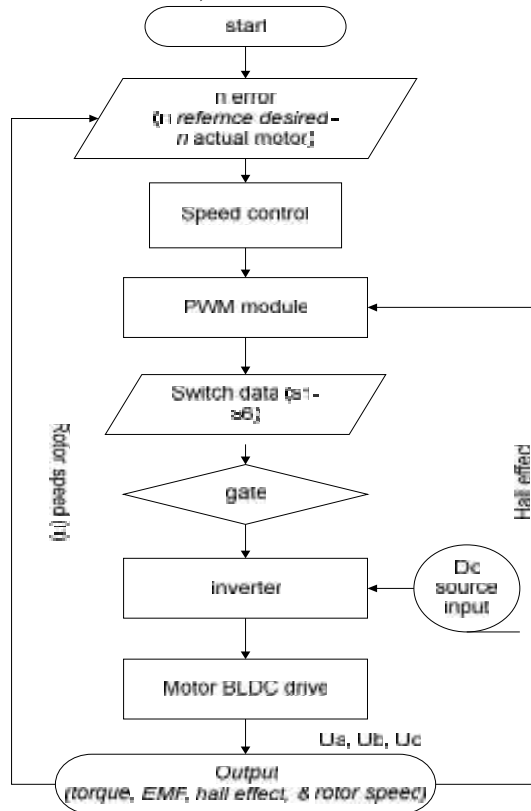
Penjelasan diagram alir

- a. Pada awal penelitian dilakukan study literature untuk memperoleh segala informasi dari berbagai referensi yang ada sebagai bahan acuan penelitian, mulai dari konsep dasar dari kerja motor BLDC, hingga simulasi virtual didalam software (MATLAB SIMULINK R2009a)
- b. Setelah memperoleh referensi yang sesuai dengan arah penelitian, langkah selanjutnya adalah membuat design model block didalam software. Karena software (MATLAB SIMULINK R2009a) yang digunakan memiliki fitur yang sesuai dengan keperluan penelitian
- c. Model block yang dibuat meliputi; *speed contoroller*, *hall decoder*, *pwm decoder*, dan *inverter*
- d. Setelah membuat model block didalam software MATLAB SIMULINK R2009a, langkah selanjutnya adalah input data parameter sesuai dengan hasil karakterisasi penelitian sebelumnya
- e. Langkah selanjutnya adalah menjalankan simulasi diagram dengan menggunakan POWERGUI discrete 1e005
- f. Hasil simulasi kemudian dicatat melalui fitur *scope* yang tedapat pada software MATLAB SIMULINK R2009a
- g. Dari hasil yang telah ditampilkan didalam *scope* kemudian dipastikan kebenaran atau kesesuaiannya, jika tidak sesuai atau hasilnya tidak memuaskan maka perlu diperbaiki dalam input parameter. Jika hasilnya memuaskan dilanjutkan ke langkah selanjutnya
- h. Langkah selanjutnya adalah optimasi, dengan memasukkan parameter dengan variable yang berbeda kedalam blok diagram
- i. Setelah memasukkan data kedalam block diagram ulangi simulasi seperti pada percobaan pertama
- j. Simulasi yang dihasilkan kemudian dicatat untuk kemudian dibandingkan dengan percobaan pertama, apakah perubahan yang terjadi cukup signifikan dari nilai output yang dihasilkan

- k.** Simulasi akan terus dilakukan jika nilai yang diperoleh kurang dari percobaan pertama, dengan mengubah parameter input dengan variable yang berbeda
- l.** Jika ooutput yang dihasilkan dari simulasi cukup memuaskan, langkah selanjutya adalah memasukkan data hasil pengujian tersebut kedalam lapoan akhir

3.4 Memahami Mekanisme kerja dari motor BLDC

Skema proses kerja dari motor BLDC dapat dilihat pada flow chart dibawah ini;



Gambar 3.3 diagram alir proses kerja motor BLDC motor controller

Seperti yang dijelaskan pada gambar diatas suatu unit *controller* dari motor BLDC terdapat 4 point utama, yaitu:

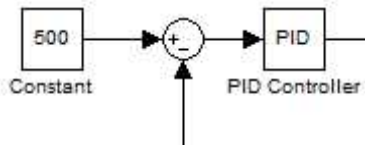
1. Speed controller
2. pwm module
3. Inverter
4. BLDC motor

3.5 Permodelan Dengan Menggunakan Software Matlab

Seperti yang dijelaskan diatas, Untuk melakukan penelitian pada *controller* motor BLDC diperlukan tahapan-tahapan permodelan pada masing-masing point, karena masing-masing point saling terhubung antara satu dengan yang lain

3.5.1 Speed Controller

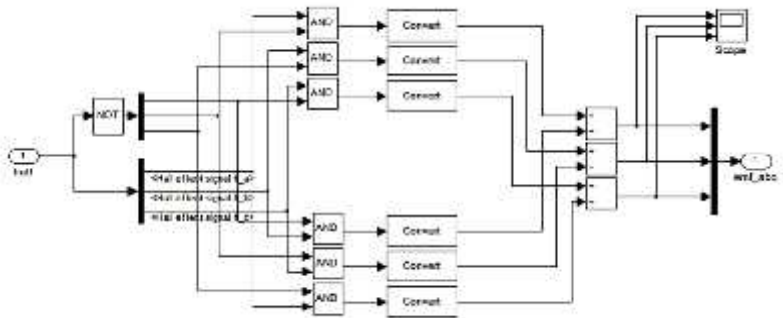
Dengan merujuk pada persamaan 3, langkah selanjutnya adalah menerjemahkan persamaan tersebut kedalam *Simulink diagram*. *simulink diagram* untuk *speed controller* adalah sebagai berikut:



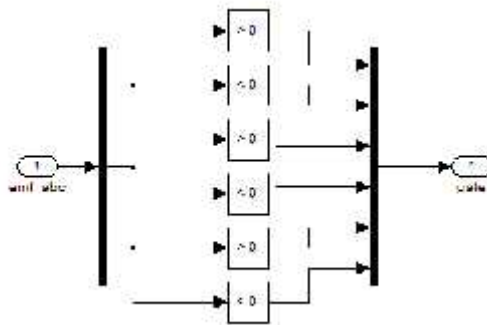
Gambar 3.4 simulink model block speed controller

3.5.2 PWM Module

Pwm modul yang digunakan untuk penelitian kali ini mengadopsi teknik svpwm, dimana histerisis diambil dari *hall effect* dari motor. Untuk pembagian mode switch-nya dipilih dengan pendekatan logika matematika NOT dan AND.



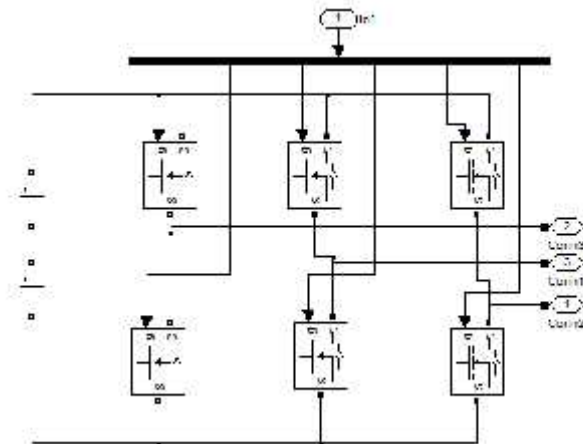
Gambar 3.5 simulink model block hall decoder



Gambar 3.6 simulink model block emf decoder

3.5.3 Inverter

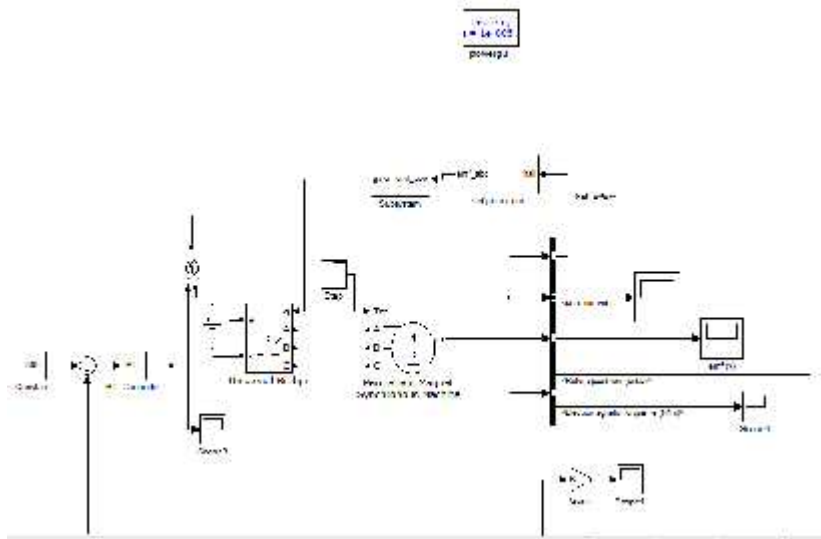
Setelah memperoleh output switching mode yang sesuai langkah selanjutnya adalah memasukkan output dari pwm decoder menuju ke inverter



Gambar 3.7 simulink model block inverter

3.6 Rangkaian Simulink diagram motor BLDC

Motor block yang digunakan dalam simulasi percobaan



Gambar 3.8 simulink model block bldc motor

3.7 Simulasi Percobaan

Simulasi percobaan dilakukan dengan memasukkan data spesifikasi motor listrik dengan rincian sebagai berikut;

Table 3.1 spesifikasi motor sebagai nilai awal input pada model block diagram

No	input	nilai
1	Voltage	48 Volt
2	Frekuensi	60 Hz
3	Rotor speed	500
4	Daya	800 Watt

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Konsep Penelitian

Pada penelitian kali ini menggunakan konsep penelitian desain dan analisa menggunakan software matlab R2009a, penelitian dilakukan dalam rangka penelitian lanjutan untuk mencari desain matematis melalui simulasi yang dapat diamati mealui data grafik yang ditampilkan melalui fitur scope yang terdapat didalam software tersebut.

Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan metode six-step switch mode yang mengambil hiterisis yang diambil dari hall effect.

Pada simulasi yang dilakukan kali ini adalah simulasi kerja dari motor tanpa beban (*unloading*), sehingga beban dari sepeda motor (rangka dan aksesoris pendukung) serta pengendara diabaikan, sehingga didapatkan output data hasil simulasi yang ideal dari motor tersebut.

4.2 Penentuan Nilai Input

Didalam simulasi percobaan kali ini menggunakan fitur permanent brushless dc motor yang didapat dari Simulink library, karena data yang diperoleh dari motor yang digunakan terbatas, maka diperlukan perhitungan manual untuk mencari nilai input yang akan digunakan pada simulasi percobaan kali ini. Adapun nilai yang diperoleh berdasarkan spesifikasi dari motor adalah sebagai berikut

Tabel 4.1 data spesifikasi motor

No	input	nilai
1	Voltage	48 Volt
2	Frekuensi	60 Hz
3	Rotor speed	500
4	Daya	800 Watt
5	inductance	0.51×10^{-3} H
6	Arus motor	15 Ampere

Karena nilai input yang diambil dari data spesifikasi belum cukup untuk digunakan untuk simulasi, maka selanjutnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus empiris untuk mencari nilai input yang diperlukan dan disesuaikan dengan data berdasarkan spesifikasi dari motor.

✓ Penentuan nilai torsi

Nilai torsi pada motor DC yang kita miliki ditentukan melalui perhitungan secara numeric. Seperti kita ketahui motor yang kita miliki memiliki daya sebesar 800 watt dan putaran sebesar 500 RPM, sehingga kita harus mengubah putaran menjadi kecepatan sudut. Adapun penghitungannya adalah sebagai berikut:

$$= \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ revolution}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 500 \frac{\text{revolution}}{\text{min}}$$

$$= 52,36 \text{ rad/s}$$

Maka penghitungan Torsi yang dilakukan adalah :

$$P = T \times$$

$$800 = T \times 52,36 \text{ rad/s}$$

$$T = 15,28 \text{ Nm}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai output dari torsi motor sebesar 15.25 Nm

✓ Penentuan nilai pole pairs

Setelah memperoleh nilai dari torsi, kemudian mencari nilai dari *pole pairs*. *Pole pairs* merupakan pasangan pole (kutub) yang terdapat pada motor DC. Sebenarnya parameter pole pairs terdapat pada bagian awal namun penentuannya harus berdasarkan nilai RPM sehingga penentuannya dilakukan pada bagian akhir. Adapun penghitungannya adalah sebagai berikut :

$$= \frac{120 \cdot F_z}{p}$$

$$500 = \frac{120 \cdot 60}{p}$$

$$p = 14.7$$

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan nilai pole sebesar 14.7. atau di bulatkan menjadi 14, karena pole terdiri dari dua kutub yaitu kutub positif dan kutub negative, sehingga nilai pole yang akan dimasukkan kedalam parameter input untuk pole pairs adalah sebesar 7 pasang.

✓ Mencari nilai motor voltage

Untuk mencari nilai Motor voltage dapat diperoleh dari hubungan daya dan arus pada motor, maka nilai dari motor voltage akan diperoleh sebaai berikut;

$$P = V \times i$$

$$800 = V \times 15 \text{ ampere}$$

$$V = 53.3 \text{ volt}$$

✓ mencari nilai hambatan pada kawat

Untuk mencari nilai hambatan diperlukan data panjang kawat (l), hambatan jenis (Qcu) , dan luas penampang kawat. Jika panjang diasumsikan sepanjang 5 m, dan hambatan jenis dari kawat tembaga diperoleh dari table 4.2

Tabel 4.2 tabel hambatan jenis dari beberapa material pada suhu 20⁰ C, sumber; *physics fifth edition 1998*

Bahan	Hambatan Jenis ($\Omega \cdot m$)
Konduktor	
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$
Emas	$2,44 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$
Raksa	98×10^{-8}
Nikrom	100×10^{-8}
Semikonduktor	
Karbon	$(3 - 60) \times 10^{-3}$
Germanium	$(1 - 500) \times 10^{-3}$
Silikon	0,1 - 60
Isolator	
Kaca	$10^9 - 10^{12}$
Karet padatan	$10^{13} - 10^{15}$

Dari table 4.2 didapatkan nilai hambatan jenis dari kawat tembaga adalah sebesar 1.68×10^{-8} ohm m, maka nilai hambatan pada kawat tembaga dapat dicari melalui perhitungan dengan menggunakan rumus dibawah ini;

$$R = \rho \cdot l / A$$

$$R = 1.68 \times 10^{-8} \cdot 5 \text{ m} / (0.5 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$$

$$R = 8.06736 \times 10^{-8} / 7.85 \times 10^{-7}$$

$$R = 0.103 \text{ ohm}$$

4.3 Input Data

Setelah melakukan karakterisasi dengan cara perhitungan secara manual, diperoleh data sebagai bahan input kedalam block diagram yang telah dibuat didalam software malab dengan rincian sebagai berikut;

Tabel 4.3 nilai input yang diperoleh dari karakterisasi melalui perhitungan manual

input	Symbol	nilai
Dc Voltage	V	48 Volt
Motor voltage	V_m	53.3 volt
Frekuensi	F_z	60 Hz
Rotor speed		500
Daya	P	800 Watt
Hambatan	R	0.103 ohm
Torsi mekanik	T_m	15.28 Nm
pole	p	7 pasang
inductance	L	$0.51 \times 10^{-3} \text{ H}$

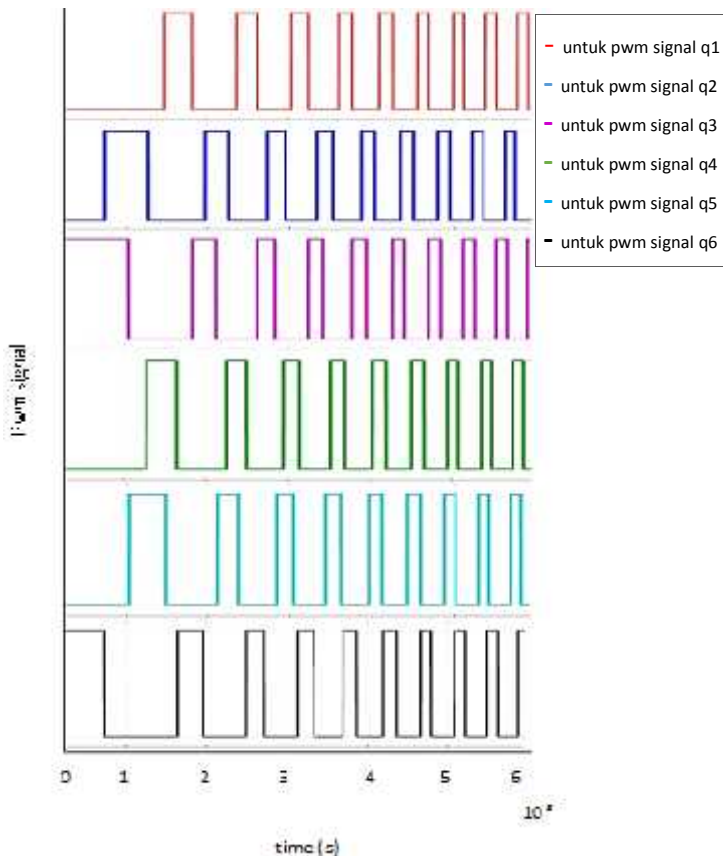
Untuk model motor yang digunakan adalah *permanent magnet synchronous motors* yang terdapat pada *Simulink library*, dengan *BEMF waveform* yang digunakan adalah *trapezoidal*. Setelah memasukan data sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan, kemudian langkah selanjutnya adalah menjalankan simulasi dengan menggunakan *powergui discrete* Ts=1e-006, dengan waktu simulasi 0.5 detik.

4.4 Hasil Percobaan

Output yang dihasilkan dari simulasi percobaan kali ini adalah data berupa grafik yang menjelaskan efek yang terjadi ketika parameter diatas dimasukkan kedalam block diagram, yang kemudian akan dicatat oleh scope sebagai monitor dari simulasi yang telah dijalankan.

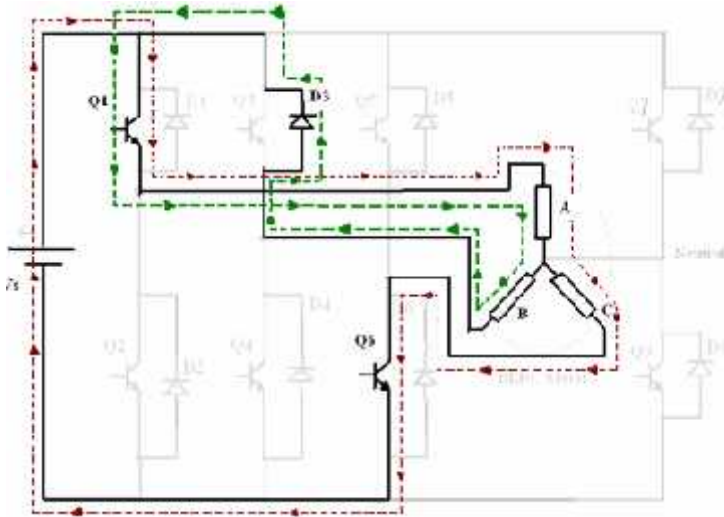
Maka hasil dari simulasi percobaan adalah sebagai berikut;

1. Pwm signal



Gambar 4.1 pwm signal dari hasil olah data pada modul hall decoder

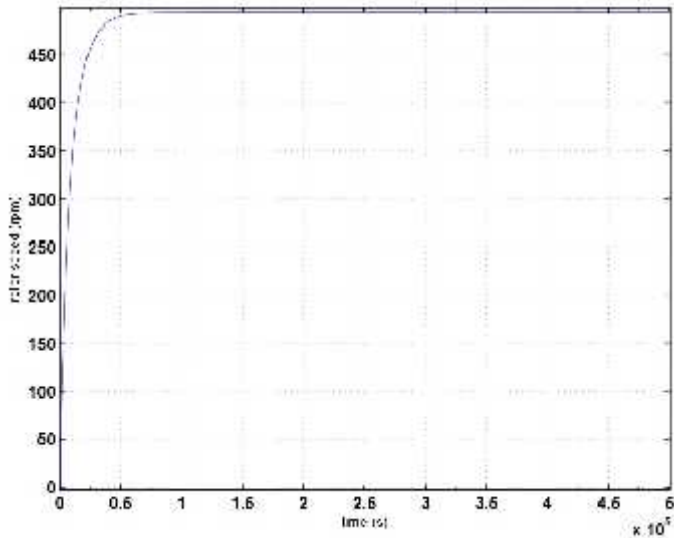
Pada gambar diatas menunjukkan pwm signal dari switch 1 – switch 2. Dari gambar diatas menunjukkan bahwa timing dari arus listrik yang mengalir dari controller menuju motor (stator) dengan urutan dari fasa A, ke fasa C, dan terakhir fasa B, jika digambarkan akan menjadi sebagai berikut;



Gambar 4.2 aliran arus listrik yang masuk dari sumber arus ke motor

Dari gambar diatas menunjukkan bahwa anak panah dengan tanda merah menunjukan aliran listrik dari baterai, mengalir menuju Q1, stator fasa A, stator fasa C, Q6, dan kembali ke baterai secara berurutan. Sedangkan anak panah dengan warna hijau menunjukan aliran dari BEMF yang mengalir dari stator fasa A, menuju stator fasa B, D3, kemudian Q1 dan kembali lagi ke stator fasa A. hal tersebut mengakibatkan arah putaran yang dihasilkan oleh motor menjadi searah dengan jarum jam atau CW (clockwise) jika disesuaikan dengan ilustrasi diatas.

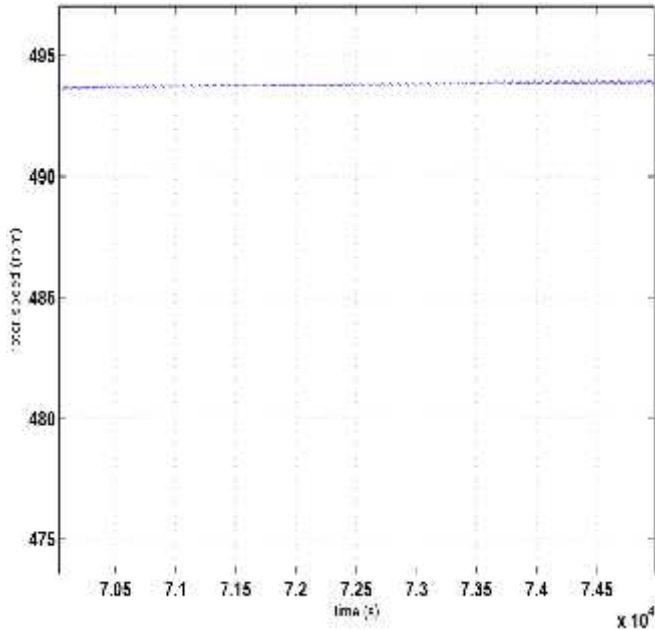
2. Rotor speed



Gambar 4.3 grafik rotor speed

Penjelasan;

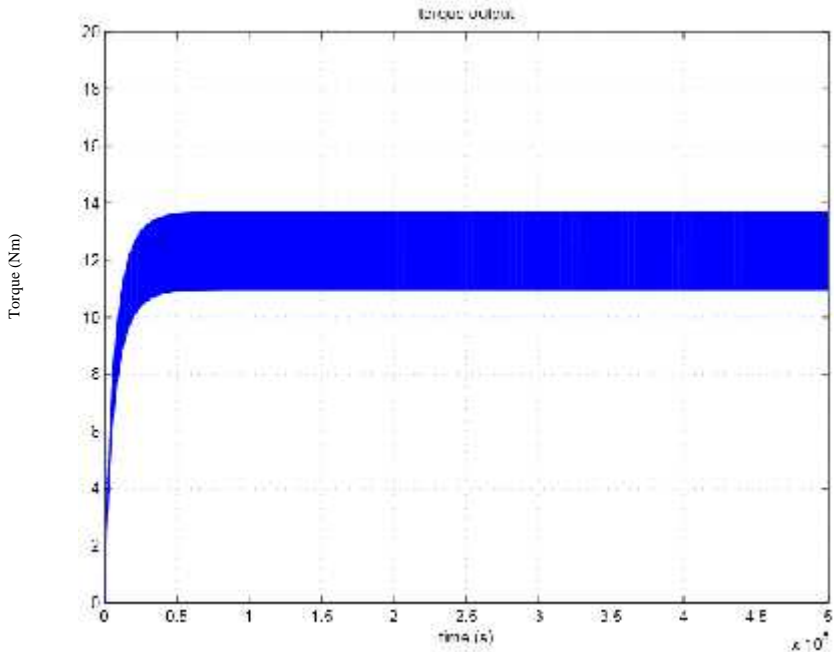
pada gambar diatas menunjukan grafik rotor speed atau kecepatan putar yang dihasilkan oleh motor berdasarkan simulasi percobaan yang telah dilakukan, yang menghasilkan nilai output motor berupa kecepatan putar maksimum mencapai 493 rpm, yang ditempuh dalam waktu 7.5×10^{-4} detik dari titik nol. atau dengan kata lain terjadi error sebesar 1.4 % dari nilai awal yang diinginkan yaitu 500 rpm. Untuk mengetahui lebih detail berapa nilai kecepatan rotor maksimum yang dihasilkan oleh motor dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 grafik rotor speed yang diperbesar dalam range waktu 7×10^{-4} - 7.5×10^{-4} detik

Pada gambar diatas menunjukkan nilai output maksimum dari putaran motor yang diperbesar dalam range waktu 7×10^{-4} - 7.5×10^{-4} detik. Dari gambar diatas menunjukkan bahwa putaran yang dihasilkan diperoleh sebesar 493 rpm. Pnurunan tersebut kemungkinan diakibatkan dari kerugian mekanis berupa rugi-rugi gesekan sehingga putaran motor terhambat

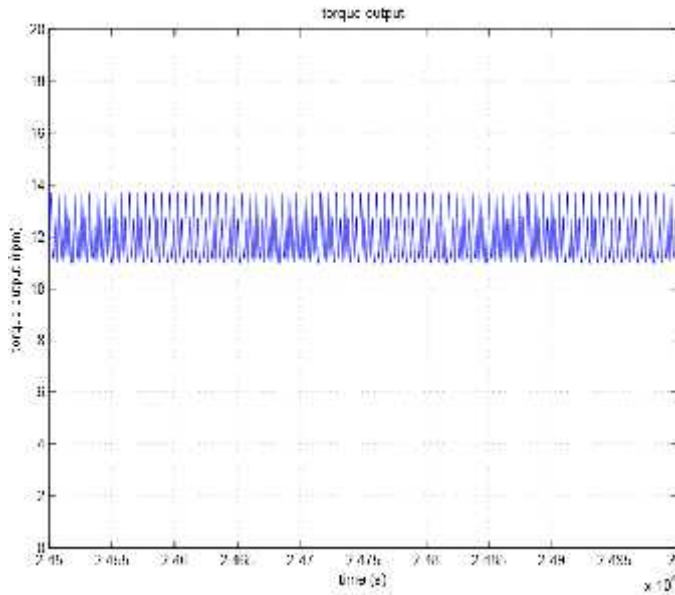
3. Torsi Output



Gambar 4.5 grafik torsi output

Penjelasan;

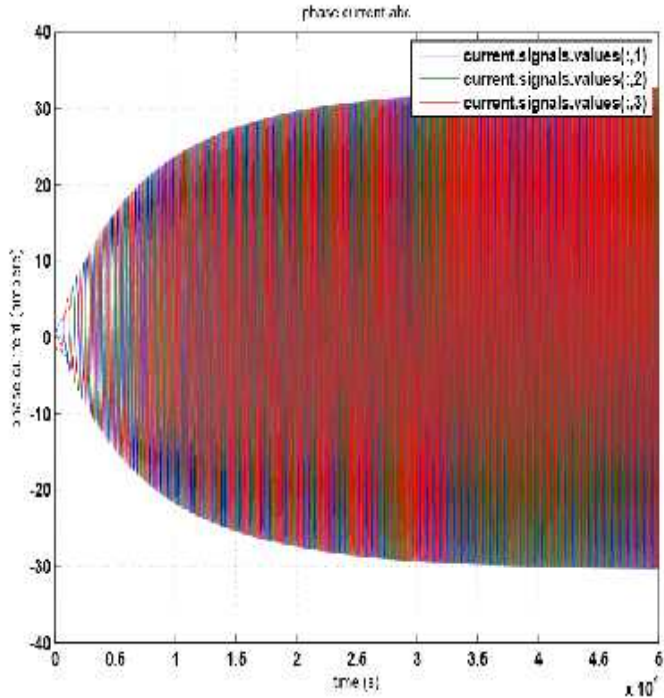
Pada gambar 4.5 merupakan hasil pencatatan data yang diperoleh dari simulasi yang menunjukkan nilai output dari motor untuk torsi, dari grafik tersebut menunjukkan bahwa diperoleh torsi output dari motor yang memperoleh nilai maksimal sebesar 13.8 Nm, dalam waktu 2.45×10^{-5} detik dari titik nol. Untuk melihat lebih detail lagi nilai maksimum dari torsi output dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 torsi output yang diperbesar dalam range waktu 2.45×10^{-5} - 2.5×10^{-5} detik

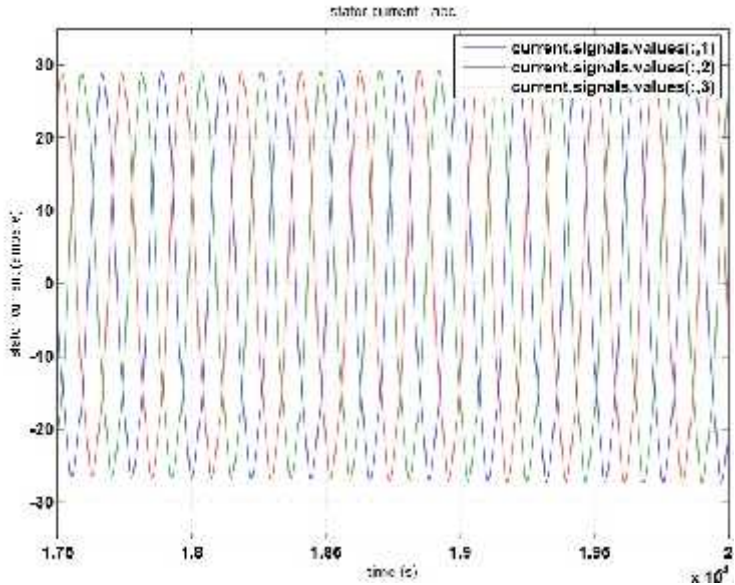
Pada gambar diatas menunjukan nilai torsi maksimum sebesar 13.8 Nm yang diperoleh pada titik 2.45×10^{-5} dari nol. jika dilihat dari grafik yang ditunjukan pada gambar diatas menunjukan bahwa nilai torsi yang dihasilkan oleh motor mengalami penurunan dari nilai torsi yang diinginkan (setpoint), hal ini dapat terjadi karena adanya rugi-rugi mekanis dari motor (kerugian akibat gesekan). Hal ini dapat terjadi karena sebuah motor terdapat mekanisme yangmana gesekan tidak dapat dihindari, sehingga output torsi yang dihasilkan tidak mencapai titik maksimum yaitu 15,28 Nm jika dikalikan dengan nilai output rotor speed yaitu sebesar 493 rpm. Maka didapat nilai daya output sebesar 712.45 watt.

4. Stator current



Gambar 4.7 grafik stator current

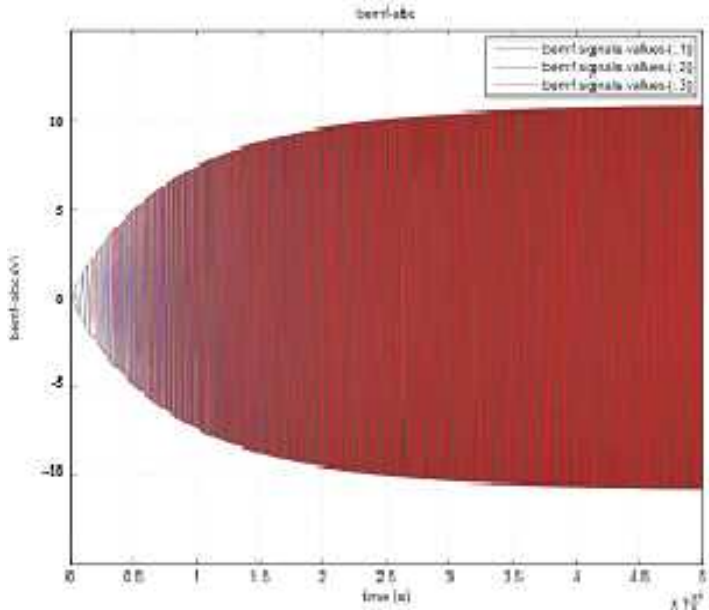
Penjelasan; berdasarkan data berupa grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.7, nilai stator current yang dihasilkan adalah sebesar 32 ampere. Karena motor memiliki tiga fasa yang berbeda untuk pembacaan grafik diatas terdapat tiga warna sebagai pembeda masing-masing fasa, garis dengan warna biru untuk fasa a, garis dengan warna hijau untuk fasa b, dan terakhir garis dengan warna merah untuk fasa c. untuk mengetahui detail dari nilai maksimum stator current dapat dilihat pada gambar 4.8



Gambar 4.8 stator current yang diperbesar dalam range waktu 1.75×10^{-4} - 2×10^{-4} detik

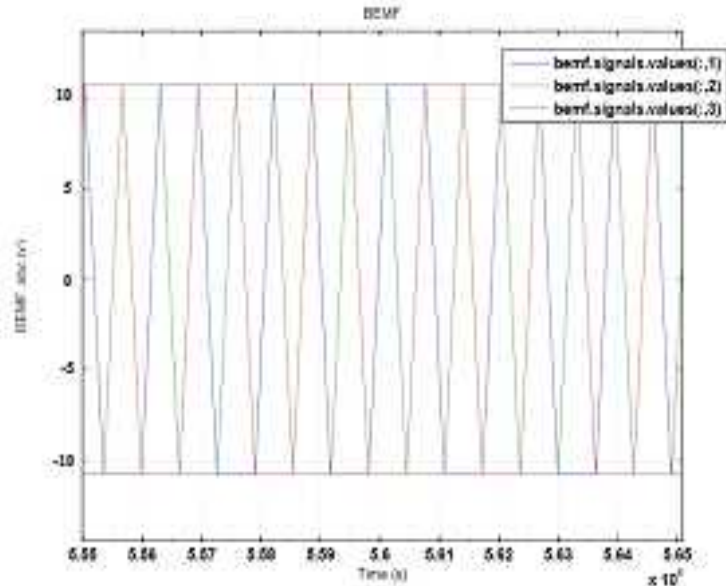
Gambar diatas menunjukkan nilai stator current maksimum yang dihasilkan oleh motor adalah sebesar 32 ampere. Untuk grafik penurunan hingga bernilai minus, merupakan efek dari BEMF (gaya balik motor). Seperti yang kita ketahui motor bldc merupakan motor jenis induksi sehingga arus dari output motor juga digunakan untuk menambah daya dari baterai ke motor yang diolah melalui *unit converter*, yang semula adalah arus dc (searah) menjadi arus ac(bolak - balik).

5. Back electromotive-force (BEMF)



Gambar 4.9 grafik bemf

Penjelasan; grafik diatas menunjukkan nilai bemf yang terjadi pada motor, seperti pada output dari stator current, bemf juga terdiri dari tiga fasa yang berbeda, dapat dilihat pada gambar garis warna biru untuk bemf pada fasa a, garis dengan warna hijau untuk fasa b, sedangkan garis dengan warna merah untuk fasa c. untuk melihat lebih detail karena grafik yang dihasilkan dari simulasi terlalu rapat dapat dilihat pada gambar 4.10



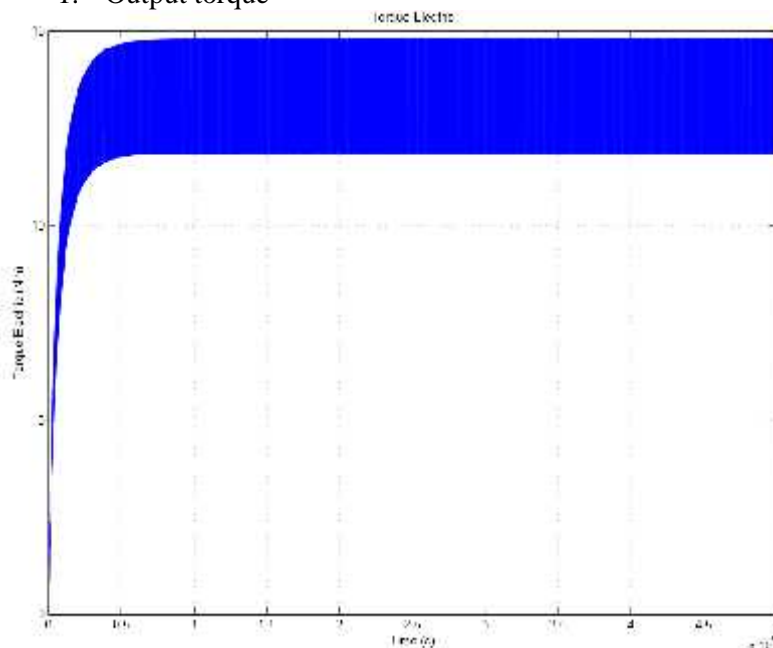
Gambar 4.10 grafik bemf diperbesar dengan range waktu 5.55- $5.65 \cdot 10^{-4}$ detik

Gambar diatas menunjukkan nilai maksimum dari bemf adalah sebesar 12 volt, hampir sama dengan stator current bemf juga mengalami zero crossing, hal inilah yang menyebabkan grafik stator current juga mengalami hal yang sama, seperti yang kita ketahui, motor BLDC terdiri dari tiga fasa yang berbeda, masing-masing memiliki sudut 120^0 , sehingga efek yang terjadi adalah pergantian input baik voltage dan current, secara periodic.

4.5 Optimasi

Pada percobaan yang kedua dilakukan dengan cara meningkatkan performance berupa peningkatan daya output dari motor. Jika pada percobaan pertama diperoleh output berupa kecepatan putar rotor sebesar 493 rpm, dan torsi sebesar 13.8 Nm, sehingga aka salah satu cara untuk menungkatkan output performance adalah dengan meningkatkan nilai torsi. Jika torsi output yang diinginkan sebesar 16 Nm maka hasilnya akan menjadi sbb;

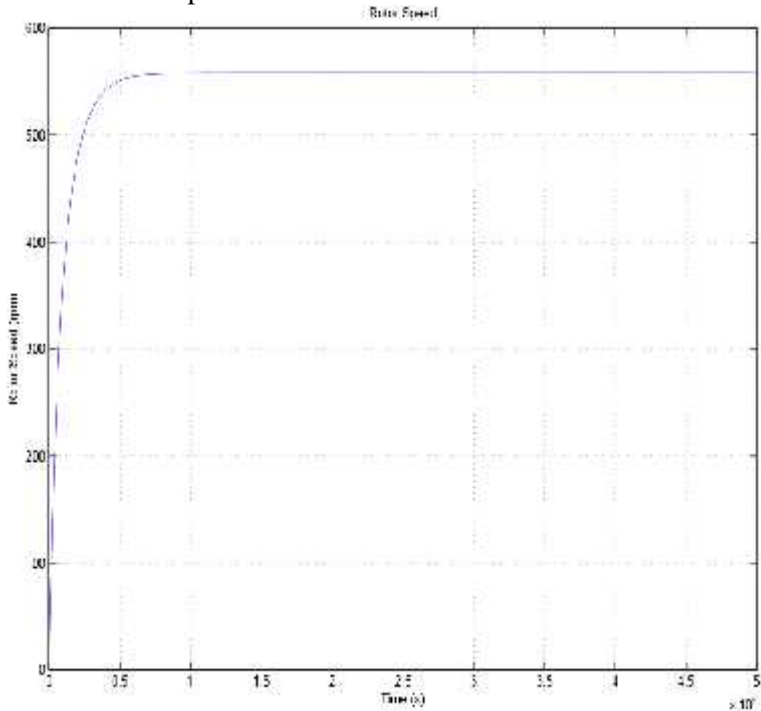
1. Output torque



Gambar 4.11 grafik output torque

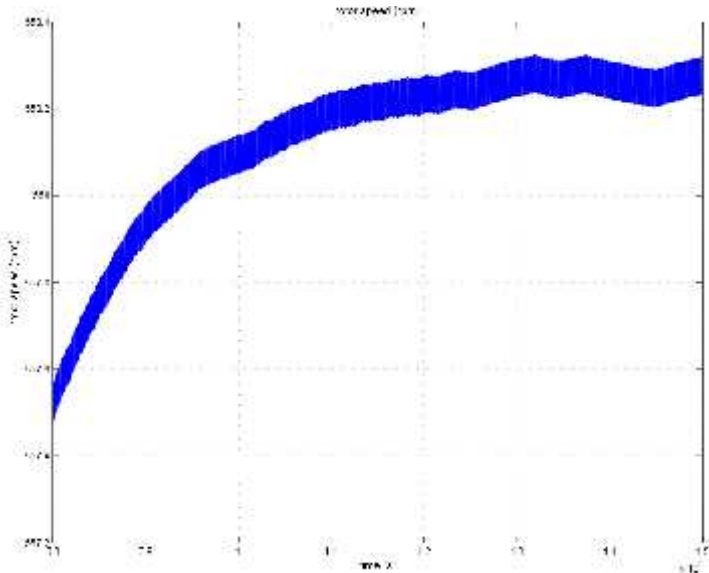
Penjelasan ; gambar 4.11 merupakan hasil dari output torque yang diperoleh dari simulasi percobaan ke-dua. Hasil puncak yang diperoleh sebesar 14.8 Nm yang ditempuh dalam waktu 0.7×10^{-5} detik dari titik nol

2. Rotor speed



Gambar 4.12 grafik rotor speed hasil optimasi

Penjelasan; pada grafik 4.11 merupakan grafik yang dihasilkan dari simulasi pada percobaan dengan penambahan nilai torsi output motor. dapat dilihat bahwa kecepatan putaran dari rotor speed meningkat menjadi 558.27 rpm yang semula hanya mencapai 493 Rpm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.13



Gambar 4.13 grafik rotor speed yang diperbesar pada range waktu 0.5×10^{-4} detik- 1.5×10^{-4} detik

Hal ini bisa terjadi Karena terdapat hubungan antara daya, torsi, dan kecepatan sudut, yang dinyatakan dalam rumus berikut;

$$P = T \times \omega$$

Sehingga dengan meningkatkan nilai torsi, secara tidak langsung kecepatan juga meningkat.

Untuk perhitunganya akan menjadi sebagai berikut;

Langkah pertama adalah mengubah satuan rotor speed dari rpm menjadi rad/secon

$$= \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ revolution}} \times 558.27 \frac{\text{revolution}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$= 58.5 \text{ rad/s}$$

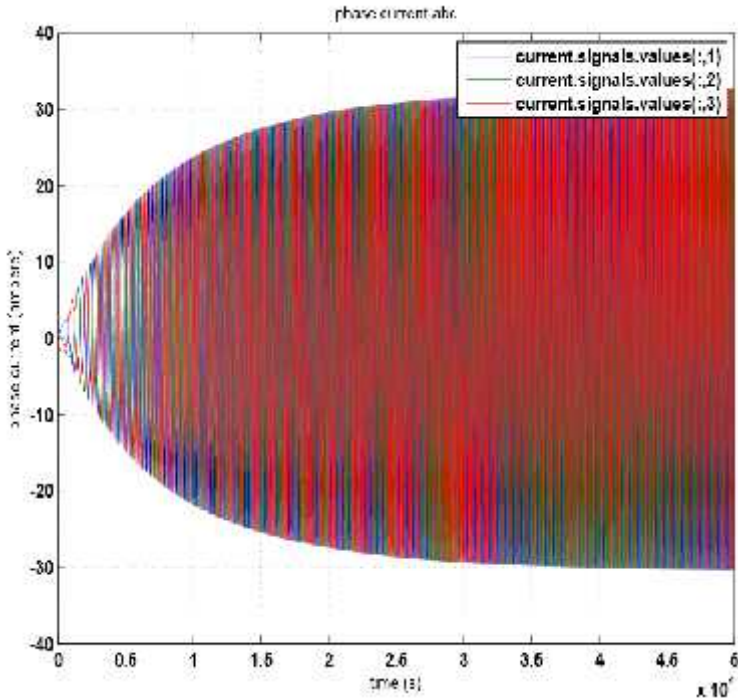
Selanjutnya adalah mencari nilai dari daya motor

$$P = T \times \omega$$

$$P = 14.8 \text{ Nm} \times 58.5 \text{ rad/s}$$

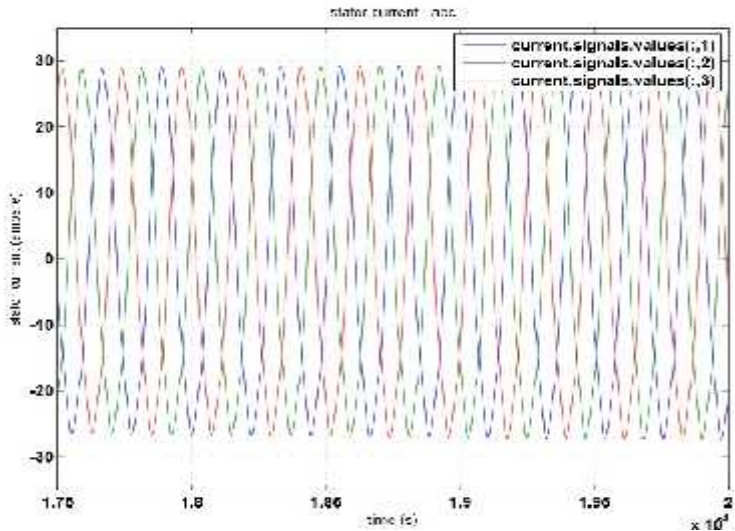
$$P = 865.8 \text{ watt}$$

3. *Stator current*



Gambar 4.14 stator current

Penjelasan; gambar 4.14 menunjukkan grafik stator current yang dihasilkan motor dari percobaan ke dua, dapat dilihat pada gambar terjadi peningkatan arus sebesar 5 ampere, jika pada percobaan sebelumnya nilai maksimum stator current adalah 25 ampere, maka pada percobaan kedua stator current maksimum adalah 35 ampere. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 grafik stator current yang diperbesar pada range waktu 1.7×10^{-5} - 2×10^{-5} detik

Gambar diatas menunjukkan nilai maksimum dari stator current pada percobaan 2 dengan angka 40 ampere yang diperoleh dalam waktu 3×10^{-4} detik dari titik nol.

Dari analisa tersebut diperoleh cara optimasi yang paling tepat untuk meningkatkan performa dari sepeda motor listrik yaitu dengan menambah daya output. Dengan menambahkan nilai output daya pada motor secara tidak langsung akan meningkatkan output mekanis berupa putaran (rotor speed) dan output torque. Karena seperti yang kita ketahui peningkatan pada output mekanis (mechanical output) dari motor tersebut, (rotor speed dan torsi output) merupakan factor yang mempengaruhi peningkatan daripada nilai daya. Sesuai dengan rumus daya $P = T \times \omega$, bahwa daya diperoleh dari torsi yang dikalikan dengan putaran, sehingga dapat ditarik kesimpulan jika torsi dan putaran (rotor speed) dinaikkan maka daya akan meningkat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan yaitu membuat desain controller motor listrik dengan menggunakan simulasi dari software matlab Simulink r2009a diperoleh data berupa grafik. Dapat ditarik kesimpulan bahwa;

1. Berdasarkan data numeric yang ditunjukkan dari nilai output dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui seberapa besar nilai daya output dari motor tersebut, sesuai dengan rumus $P = T \cdot \omega$, misalnya pada percobaan 1, rotor speed yang semula sebesar 500 rpm namun setelah dilakukan simulasi ternyata hanya mampu mencapai 493 rpm, sedangkan nilai output berupa torsi output diperoleh sebesar 13.8 Nm, sama halnya dengan nilai output dari rotor speed. Sehingga didapat nilai daya output sebesar 712.45 watt.
2. Penambahan nilai torsi dapat meningkatkan nilai output daya dari motor listrik. Hal ini dapat dibuktikan pada percobaan 2 yang mana dilakukan optimasi dengan menambah nilai torsi yang semula 15.28 Nm, ditambah menjadi 16 Nm. Sehingga diperoleh nilai output sebesar 13.8 Nm menjadi 14.8 Nm, dan rotor speed yang sebelumnya sebesar 493 rpm menjadi 558.47 rpm. Sehingga diperoleh output daya sebesar 865.8 watt.

5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, optimasi performance yang efektif adalah dengan memberikan ubahan pada motor terutama pada lilitan stator, serta mengubah spesifikasi pada controllernya, hal ini ditujukan agar memperoleh output yang optimal. Apabila ubahanhan tersebut dilakukan hanya pada salah satu sector saja dampak yang diakibatkan tidak akan terasa maksimal, bahkan dampak negative akan diperoleh, misalnya saja dengan mengubah spesifikasi controller dengan spesifikasi yang lebih tinggi daripada motor hal yang akan terjadi adalah motor tidak dapat menerima output dari controller (voltage ataupun arus listrik) dengan baik. Makadari itu optimasi untuk memperoleh output motor yang efektif adalah dengan mengubah kedua sector.

LAMPIRAN

Parameter Input Percobaan 1

Block Parameters: Permanent Magnet Synchronous Machine

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back EMF. The sinusoidal machine is modelled in the dc rotor reference frame and the trapezoidal machine is modelled in the abc reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The preset models are available only for the Sinusoidal back EMF machine type.

Configuration Parameters Advanced

Stator phase resistance R_s (ohm):

18.7

Stator phase inductance L_s (H):

0.51e-3

Specify: Voltage Constant ($V_{peak_LL} / \text{krpm}$)

Flux linkage established by magnets (Vs):

0.04176

Voltage Constant ($V_{peak_LL} / \text{krpm}$):

52

Torque Constant (Nm / A_peak):

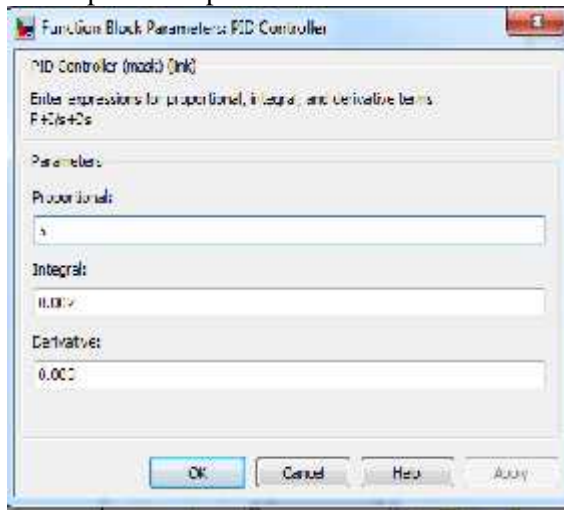
0.45656

Back EMF flat area (degrees):

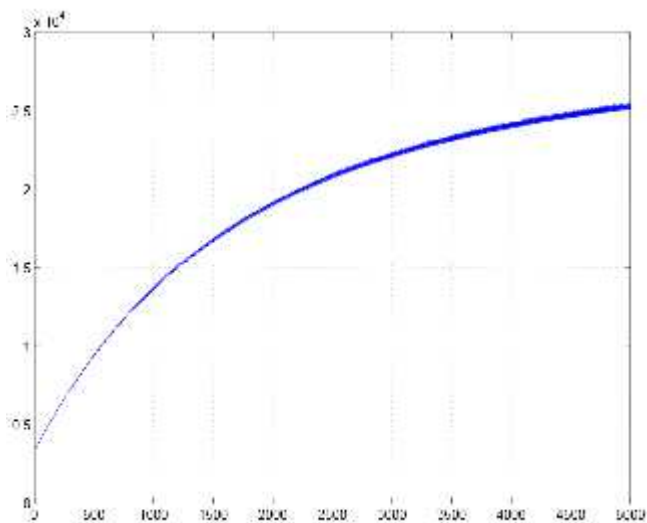
180

OK Cancel Help Apply

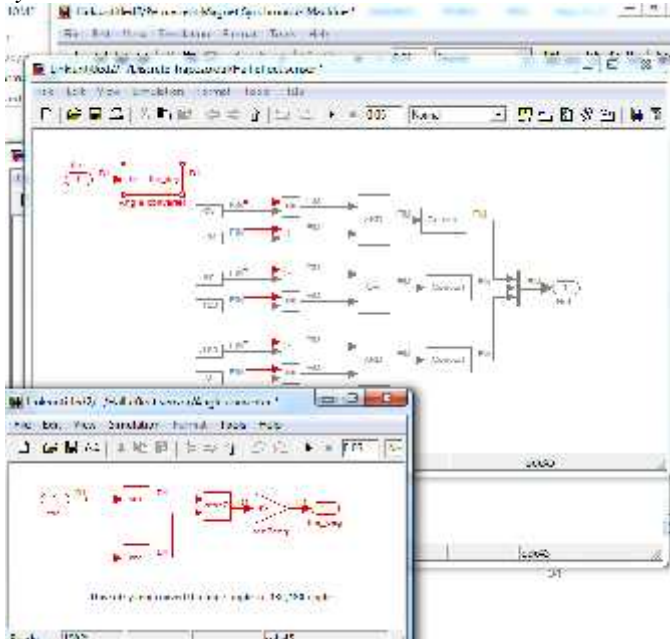
Parameter input untuk pid controll



Waveform untuk hasil dari simulasi PID controll



Histerisis *hall effect* yang tersedia didalam *permanent magnet synchronous brushless dc motor*



Scope data yang diambil dari emf decoder

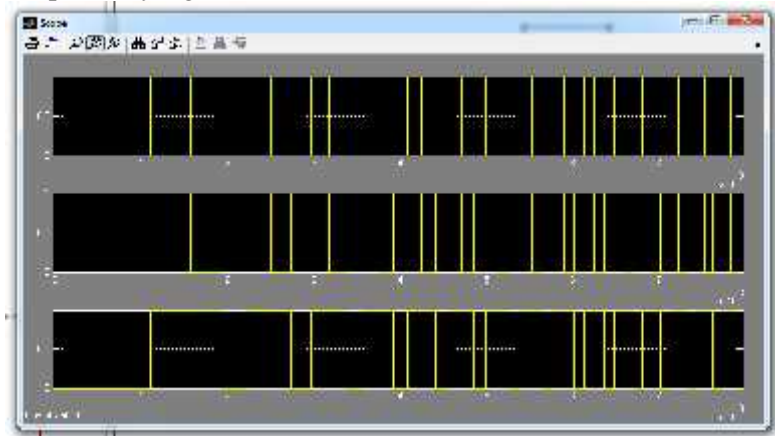


Table hambatan jenis

Bahan	Hambatan Jenis ($\Omega \cdot m$)
Konduktor	
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$
Emas	$2,44 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$
Raksa	98×10^{-8}
Nikrom	100×10^{-8}
Semikonduktor	
Karbon	$(3-60) \times 10^{-3}$
Germanium	$(1-500) \times 10^{-3}$
Silikon	$0,1-60$
Isolator	
Kaca	10^9-10^{12}
Karet padatan	$10^{13}-10^{15}$

Sumber: *Physica Fifth Edition, 1958*

DAFTAR PUSTAKA

1. Alshehabi, *Improving the Performance of Brushless DC Motor Using the Six Digits form of SVPWM Switching Mode*, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, 2012
2. V.Viswanathan. *A Novel Current Controlled Space Vector Modulation based Control Scheme for Reducing Torque Ripple in Brushless DC Drives*, Research Scholar, Department of EEE, JNTU, Hyderabad, India, 2011
3. Philip, Preetha. *Modelling Of Brushless DC Motor Drive Using Sensored And Sensorless Control (back EMF zero crossing etection)*, Dept. of Electrical Engg. Govt. Engineering College, Thrissur, 2012
4. K. Giridharan, *Implementation Of A Brushless Dc Motor As A Virtual Motor*, Department of Electrical Engineering, VIT University, India. 2013
5. Steffy, S. Assly. *Analysis And Simulation Of Speed Control Of PMBLDC MOTOR by PI Controller*, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, Coimbatore, India, 2011
6. S. Baldursson, *BLDC Motor Modelling and Control–A MATLAB/Simulink Implementation* , Master Thesis, May, 2005.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Biodata Penulis



Nanang masudi, tempat tanggal lahir Lamongan 16 april 1993, anak pertama dari dua bersaudara, riwayat pendidikan formal yang telah ditempuh; sdn 1 nogojatisari tahun masuk 1999, kemudian dilanjutkan ke jenjang sekolah menengah pertama, yaitu smpn 1 sambeng pada tahun 2005, setelah dinyatakan lulus dari sekolah menengah pertama (smp), kemudian melanjutkan pendidikan disalah satu sekolah menengah kejuruan diwilayah selatan

lamongan, yaitu smkn 1 sambeng pada tahun 2008, bidang study yang dipilih adalah teknik kendaraan ringan, pada tahun kedua penulis sempat mengadakan kerja praktek disalah satu anak perusahaan PT. SEMEN GRESIK (yang sekarang namanya diubah menjadi PT.SEMEN INDONESIA) yaitu PT.VARIA USAHA selama 2 bulan, sesuai dengan bidang yang ditekuni yaitu bidang otomotif (teknik kendaraan ringan). Setelah tiga tahun menempuh pendidikan di SMK, pada tahun 2011 penulis melanjutkan tingkat pendidikan ke diploma 3 its, program study yang dipilih adalah teknik mesin, dan fokus pada bidang manufaktur. Penulis sempat aktif dibeberapa kegiatan yang diadakan oleh himpunan mahasiswa d3 teknik mesin, mulai dari pelatihan baik peserta maupun panitia, menjadi salah satu staff di hima (ristek), serta menjadi asisten lab (lab teknologi mekanik/ teknik perautan) selama dua periode kepenurunan.